

IX SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

DERIVA DE PARTÍCULAS Y ESTIMACIÓN DEL DESEMPEÑO DE TRAYECTORIAS DE ELEMENTOS FLOTANTES A PARTIR DE MODELOS GLOBALES Y LOCALES: APLICACIÓN A LA EMERGENCIA SAR DEL ACCIDENTE AÉREO DEL AVIÓN C-212, 2 DE SEPTIEMBRE DE 2011, ARCHIPIÉLAGO DE JUAN FERNÁNDEZ, CHILE.

Pablo Córdova M.^{1*} y Raúl Flores A.²

1. RESUMEN

Search And Rescue (SAR) se refiere a toda operación llevada a cabo para encontrar a alguien que se cree perdido, enfermo o herido en áreas remotas o poco accesibles. Se ha estimado que un 41% de los casos totales corresponden a casos marítimos. En Chile, el servicio SAR se activó 708 veces, registrando 16 muertes, 53 desapariciones, 33 heridos y 606 ilesos durante el año 2019. En el presente estudio, se desarrolló un Estimador Múltiple de Deriva de Partículas (EMDP) tomando como fuente de información Modelos Hidrodinámicos Globales (MHG) y un Modelo Hidrodinámico Local (MHL), específicamente FVCOM. Las trayectorias fueron evaluadas mediante el Desempeño Radial Vinculado al Origen (RPLO), utilizando datos recopilados durante la emergencia SAR del 2 de septiembre de 2011. El desempeño de los modelos evaluados varió caso a caso, asociado principalmente a las condiciones océano atmosféricas y sus variaciones locales, registrando un buen desempeño de los modelos con influencia de la marea en épocas de viento en calma y un mejor desempeño de los modelos con influencia del viento, cuando éste superó los 7 km h⁻¹. El uso de MHL permitió resolver la circulación incluyendo los efectos orográficos y batimétricos del Archipiélago de Juan Fernández, resultando en una mejora en variabilidad y distribución de las trayectorias modeladas respecto a las proyectadas mediante los MHG.

¹ Encargado de Laboratorio de procesos Costeros. Escuela de ingeniería Oceánica. Universidad de Valparaíso, pablo.cordovam@uv.cl

² Profesor asistente, Departamento de Obras Civiles. Universidad Técnica Federico Santa María Empresa, raul.flores@usm.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los accidentes ocurridos en el mar, a diferencia de los ocurridos en tierra, suceden en un medio dinámico, a veces caótico, dominado en superficie principalmente por el viento, la marea y el oleaje, lo que además implica limitaciones en la cobertura de mediciones instrumentales. Estas características, sumadas a otras asociadas a la sobrevivencia, como el efecto de hipotermia, la salinidad y la escasa disponibilidad de alimento en su superficie, hacen de las emergencias SAR marítima una de las más complejas de resolver, donde la adquisición de datos y la generación de pronósticos, idealmente en tiempo real, se vuelve crítico.

A nivel internacional, existen variados estudios sobre el uso de modelos hidrodinámicos en casos de emergencia SAR, como el trabajo de Chen *et al.* (2012), en el que se utilizó el modelo FVCOM (Finite-Volumen Community Ocean Model) acoplado al modelo atmosférico WRF (Weather Research and Forecasting Model) para estimar la ubicación del accidente del avión Air France 447 accidentado en junio de 2009, en el Océano Atlántico Ecuatorial. Cho *et al.* (2014) desarrolló y validó un sistema operativo de búsqueda y rescate marítimo para el mar Amarillo y mares este y sur de China, acoplando el modelo hidrodinámico MOHID y el modelo atmosférico WRF. Révelard *et al.* (2021) recientemente propuso una metodología para medir el desempeño de las simulaciones lagrangianas y su aplicación en el servicio de clasificación de datos en tiempo real como sistema integrado de soporte de decisiones ante emergencias SAR de la península Ibérica (IBISAR <http://www.ibisar.es/es/>). Otros sistemas como el desarrollado por Serra *et al.* (2020), buscan optimizar el proceso de búsqueda mediante la obtención de información relevante a partir de la interpretación de las OECSs (Objective Eulerian Coherent Structures) y la estimación de regiones de acumulación de objetos flotantes en superficie o TRAPs (TRansient Attracting Profiles).

Una característica general de las herramientas numéricas diseñadas para brindar apoyo ante emergencias SAR marítimas, es su tendencia a la diversificación metodológica asociada a la región donde se desarrolla la emergencia y los recursos involucrados en aquello. Los sistemas más desarrollados suelen contar con sistemas de monitoreo continuo mediante radares HF (ej. IOOS, Integrated Ocean Observing System de EEUU); sistemas acoplados entre modelos atmosféricos y oceánicos previamente validados, generando pronósticos de forma continua (ej. sistema de monitoreo ambiental Copernicus de la Unión Europea); y sistemas de búsqueda satelital de restos y señales (COPAS-SARSAT). Algo similar ocurre con los métodos para la estimación de trayectorias, los que varían entre métodos empíricos, tales como LEEWAY (Hufford & Broida, 1976); métodos Determinísticos (Di Maio *et al.*, 2016); y métodos indirectos tales como la estimación de TRAPs (Serra *et al.*, 2020), entre otros.

En un esfuerzo por conjugar fuentes y métodos y evaluarlos indistintamente, el presente trabajo propone un Estimador Múltiple de Deriva de Partículas (EMDP), el cual considera como fuentes de información de corrientes los Modelo Hidrodinámicos Globales (MHG) HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) (Chassignet *et al.*, 2009) de Estados Unidos y MULTI OBS_015_004 (Rio *et al.*, 2014) de la Unión Europea; el Modelo Atmosférico Global (MAG) ERA5 (Hersbach *et al.*, 2020); y el Modelo Hidrodinámico Local (MHL) FVCOM (Chen *et al.*, 2003). También considera el cálculo de trayectorias de forma directa (velocidad directa de la fuente), determinística (velocidad resultante del balance de fuerzas de arrastre) y mediante LEEWAY (Hufford y Broida, 1976).

Los resultados fueron evaluados en comparación a mediciones instrumentales de marea, derivadores superficiales, mediante el índice de Desempeño Radial Vinculado al Origen (RPLO) y de hallazgos registrados durante la emergencia SAR del 2 de septiembre de 2011, fecha donde el avión C-212 de la Fuerza Aérea de Chile (FACH), vuelo que terminó con la caída del avión al mar, entre isla Santa Clara e isla Robinson Crusoe.

2. ANTECEDENTES

La zona en estudio corresponde al archipiélago de Juan Fernández, específicamente las islas Robinson Crusoe y Santa Clara, ubicadas a ~360 MN (~667 km) de la bahía de Valparaíso, Chile. Estas islas son montañosas, de formación volcánica, altas y escarpadas (SHOA, 2013) (Fig. 1).

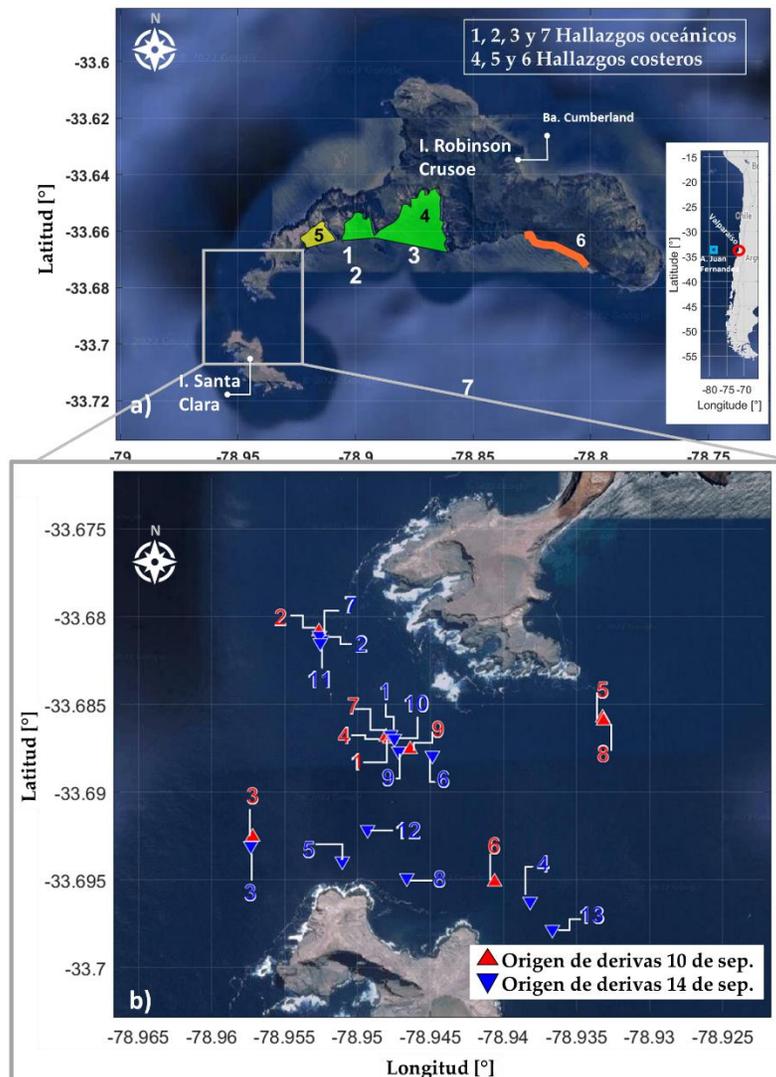


Figura 1. Archipiélago de Juan Fernández.

El día 2 de septiembre de 2011, el avión de transporte táctico ligero Casa 212 Aviocar de la Fuerza Aérea de Chile (FACH), despegó a las 14:00 HL (17:00 UTC) desde el Aeropuerto Arturo Merino Benítez de Santiago, Chile, destino al aeródromo de la Isla Robinson Crusoe (Fig. 1), con 21 personas entre pasajeros y tripulantes. En la cercanía a isla y luego de varios intentos fallidos de aterrizaje, se pierde el contacto con la aeronave a las 17:48 HL (20:48 UTC). En ese momento, se presentaban condiciones de tiempo adversas, con fuertes gradientes de velocidad del viento (wind shear), que, sumado a la compleja orografía del área, son capaces de provocar inestabilidades atmosféricas, fuertes turbulencias y flujos verticales, condiciones que además cambian abruptamente en cortos periodos de tiempo. Gracia (2017) concluye que el avión sufrió una pérdida de control y entrada en baja cuando se encontraba a una altura de ~200 m y una trayectoria muy baja respecto a la altura del aeródromo.

Durante la emergencia SAR, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), realizó mediciones mediante derivadores superficiales y subsuperficiales (1.5, 10 y 20 m de profundidad, respectivamente) los días 10 y 14 de septiembre de 2011 (Fig. 1). Tanto la Armada de Chile como la Fuerza Aérea de Chile (FACH), fueron las encargadas de recopilar los hallazgos encontrados en la época del accidente, los que en general correspondieron a restos poco homogéneos, característicos de un accidente de gran impacto y se situaron principalmente en las bahías de la zona sur de isla Robinson Crusoe (Fig. 1).

3. METODOLOGÍA

La selección de los MHG y MAG se basó en la disponibilidad de datos durante la época del accidente y la disponibilidad actual de pronósticos por parte de la institución encargada de publicar los datos, mientras que la selección del MHL, se basó en su disponibilidad open source y capacidad de adaptación a zonas costeras mediante el uso de grillas no estructuradas.

Entre las fuentes globales de información, se utilizaron los datos de reanálisis del MHG GOFS 3.1 (identificado como HYCOM) del Centro de Estudios de Predicción Océano-Atmosférico (COAPS), de Estados Unidos. Este modelo es un acoplamiento entre el modelo global HYCOM (Modelo Oceánico de Coordenadas Híbridas) (Chassignet et al., 2009), y CICE (Modelo de Hielo Marino de Los Álamos) (Hunke and Lipscomb, 2008). La resolución espacial y temporal del modelo HYCOM es de 0.08° ($1/12^\circ$) y 3 horas, respectivamente.

También fueron utilizados los datos de reanálisis del MHG MULTIOBS_015_004 (Rio et al., 2014) (identificado como MULTIOBS), generados por el Centro de Producción CLS (MULTIOBS-CLS-TOULOUSE-FR) y descargados desde el sistema de monitoreo ambiental COPERNICUS de la Unión Europea. La resolución espacial y temporal de este modelo MULTIOBS es de 0.25° ($1/4^\circ$) y 3 horas, respectivamente.

La componente atmosférica utilizada corresponde a datos de viento a 10 m de la superficie proveniente del MAG ERA5 (Hersbach et al., 2020), este modelo fue utilizado tanto para el forzado del MHL, la estimación de trayectorias mediante LEEWAY y la componente atmosférica para la resolución física de los coeficientes de arrastre del sistema determinístico. Este producto forma parte del Sistema de Pronóstico Integrado (IFS) del Centro Europeo de Pronóstico del Tiempo de

Rango Medio (ECMWF). La resolución espacial y temporal del modelo ERA5 es de 0.25° ($1/4^\circ$) y 3 horas, respectivamente.

La ejecución del MHL fue llevado a cabo mediante el uso del FVCOM (Finite-Volumen Community Ocean Model), modelo tridimensional desarrollado originalmente por Chen *et al.* (2003) y que posee la capacidad de resolver las ecuaciones primitivas de gobierno en coordenadas cartesianas y esféricas, en su forma integral, mediante el cálculo de flujos entre volúmenes de control triangulares no sobrepuestos. En la vertical se utilizaron coordenadas sigmas distribuidas en 20 capas. FVCOM fue configurado para obtener datos a partir de 10 días antes del momento del accidente, periodo utilizado para su estabilización. La resolución temporal de cálculo interno del modelo se configuró cada 1 s, mientras que la resolución de salida fue cada 30 min.

La batimetría fue impuesta a partir de mediciones de monohaz y multihaz realizadas por el SHOA y datos de GEBCO (2019). Se generó una grilla no estructurada de 6336 nodos, 12073 vértices, de espaciamiento máximo de $\sim 2,6$ km costa afuera y mínimo de ~ 46 m en costa. Las condiciones de borde de la temperatura y la salinidad fueron tomadas a partir de perfiles históricos presentes en el área (Rojas & Silva, 1996), considerando una temperatura entre 15°C y 2°C y salinidad de entre 33.8 y 34.6, de superficie a fondo, respectivamente. Finalmente, se utilizaron datos de caudal medio ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), calculado a partir de las componentes de flujo u y v del modelo MULTIOBS, tomando como referencia el volumen de cada elemento triangular por capa de profundidad. El flujo medio fue incorporado como forzante en los nodos frontera del modelo.

La generación de los escenarios de modelado a escala local se realizó a partir los antecedentes atmosféricos y oceanográficos del área, que describen una interacción entre la dominancia del viento y la marea en la zona del canal entre isla Santa Clara e isla Robinson Crusoe. Por lo tanto, la ejecución de FVCOM se separó en los siguientes escenarios: forzado sólo con marea (M), sólo con viento (V) y marea más viento (M+V). Para el forzamiento con marea, se utilizó la amplitud y fase obtenida a partir del modelo global de TPXO (Egbert & Erofeeva, 2002), utilizando como constituyentes armónicas M2, S2, N2, K2 y K1, correspondiente al régimen de marea mixto típico de las costas de Chile (SHOA, 1999). El forzamiento con del viento se realizó a partir de datos del modelo ERA5.

Para determinar las trayectorias de los elementos flotantes (medidos y hallados) durante la emergencia SAR, se implementó un Estimador Múltiple de Deriva de Partículas (EMDP), que contempla variadas fuentes de información y variadas metodologías para la estimación de la velocidad de una partícula y su trayectoria a nivel superficial.

El EMDP se basa en la resolución de la ecuación diferencial ordinaria (EDO):

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{v}_{ob}(\vec{x}(t), t) \quad (1)$$

donde $\vec{x}(t)$ corresponde a la posición inicial de la objeto o partícula y \vec{v}_{ob} a su velocidad (vectorial).

La \vec{v}_{ob} fue determinada mediante dos métodos: primero, el método directo (Dir.), en el que la velocidad empleada fue igual a la velocidad interpolada desde los campos de corriente de los MHG y el MHL. El segundo método correspondió al método determinístico (Det.), a partir de la metodología aplicada por Di Maio *et al.* (2016), donde se estimó \vec{v}_{ob} a partir del balance de las

fuerzas de arrastre actuando sobre el objeto simétrico, es decir, despreciando el efecto de levantamiento o "lift" y en estado estacionario:

$$F_p + F_E + F_{Dl} + F_{Da} = 0 \quad (2)$$

donde F_p es el peso del objeto; F_E las fuerzas de empuje del objeto; F_{Dl} es la fuerza de arrastre del líquido sobre el objeto y F_{Da} es la fuerza de arrastre de aire sobre el objeto. En el eje vertical, se asumió que $F_p + F_E = 0$, es decir, que el cuerpo se mantuvo con flotabilidad neutra. Para simplificar el problema, también se asumió como conocida e invariante la proporción de cuerpo emergido y sumergido (R_E y R_S , respectivamente).

Paralelamente, se utilizó el método LEeway basado en el trabajo de Hufford y Broida (1976) y desarrollado extensamente en los reportes denominados LEeway Divergence del Centro de Desarrollo e Investigación de la Guardia Costera de Estados Unidos (Allen, 2005). A partir del viento a 10 m se estimaron la componente de reducción vertical (Downwind, DWL) y su componente cruzada (Crosswind, CWL), considerando los valores óptimos de regresión determinados empíricamente y tabulados en Allen (2005), para diferentes categorías de elementos a la deriva:

Una vez definida la \vec{v}_{ob} , la ecuación (1) fue resuelta mediante el esquema numérico Explícito Runge-Kutta (ERK), de cuatro etapas y cuarto orden (Celia & Gray, 1992). Este método es también utilizado por FVCOM para resolver las trayectorias de forma interna (Chen *et al.*, 2013). Finalmente, para capturar la dispersión natural de las corrientes de meso y submesoescala, se aplicó un paso aleatorio de distribución normal y de divergencia direccional no mayor a 20°, para cada paso de tiempo.

El análisis cuantitativo del desempeño de las trayectorias modeladas se realizó mediante la comparación directa respecto las derivas medidas en terreno durante la campaña de mediciones realizadas por el SHOA los días 10 y 14 de septiembre durante la emergencia SAR, en la que se liberaron derivadores superficiales, en diferentes puntos entre isla Santa Clara e isla Robinson Crusoe (Fig. 1).

El desempeño cuantitativo de las trayectorias obtenidas fue estimado a partir del cálculo de Desempeño Radial Vinculado al Origen (RPLO) presente en la ecuación (3), que permite analizar el desempeño de las trayectorias como una razón entre la diferencia de áreas proyectadas desde el origen, a partir del Recorrido Observado (RO) y el Recorrido Modelado (RM), normalizado por el RO y en número de observaciones (N) (Fig. 2).

$$RPLO = \sum_{i=1}^N \frac{2 \frac{\alpha_i}{180} (A_{obs} - A_{mod})}{N A_{obs}} \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

Donde N es el número de observaciones; α_i es el ángulo formado entre RO, RM y el origen de la deriva; A_{obs} es el área estimada a partir de radio formado entre RO y el origen de deriva y A_{mod} es el área estimada a partir de radio formado entre RM y el origen de deriva.

Para la evaluación cualitativa de las trayectorias, se liberaron un total de 260 partículas en un radio de 300 m alrededor del punto del accidente de coordenadas 33° 41' 32.64'' S y 78° 56' 09.0'' W. Dichas partículas fueron liberadas cada 30 min durante 6 hrs desde el momento del accidente y se evaluó el desplazamiento de estas durante los siguientes 6 días.

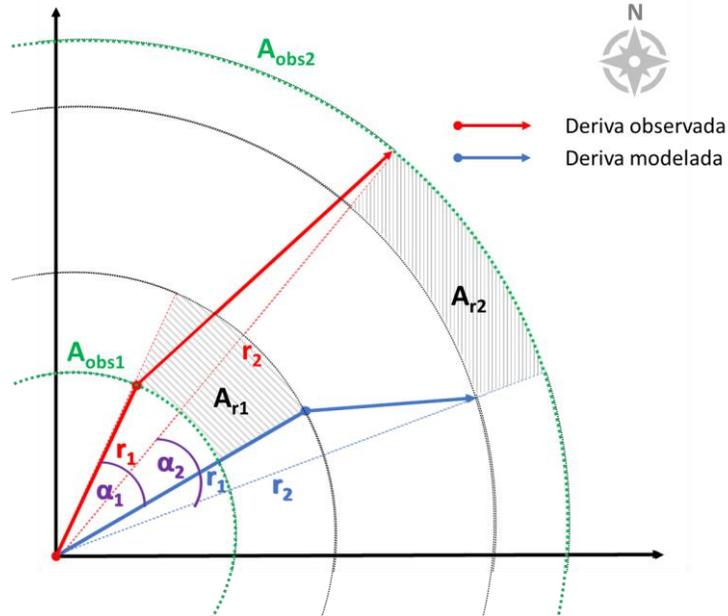


Figura 2. Diagrama de cálculo del RPLO.

4. RESULTADOS

El análisis cuantitativo del desempeño entre derivas medidas y modeladas durante las mediciones del 10 y 14 de septiembre. La Figura 3 muestra la marea modelada mediante FVCOM por sección según el periodo de medición con los derivadores.

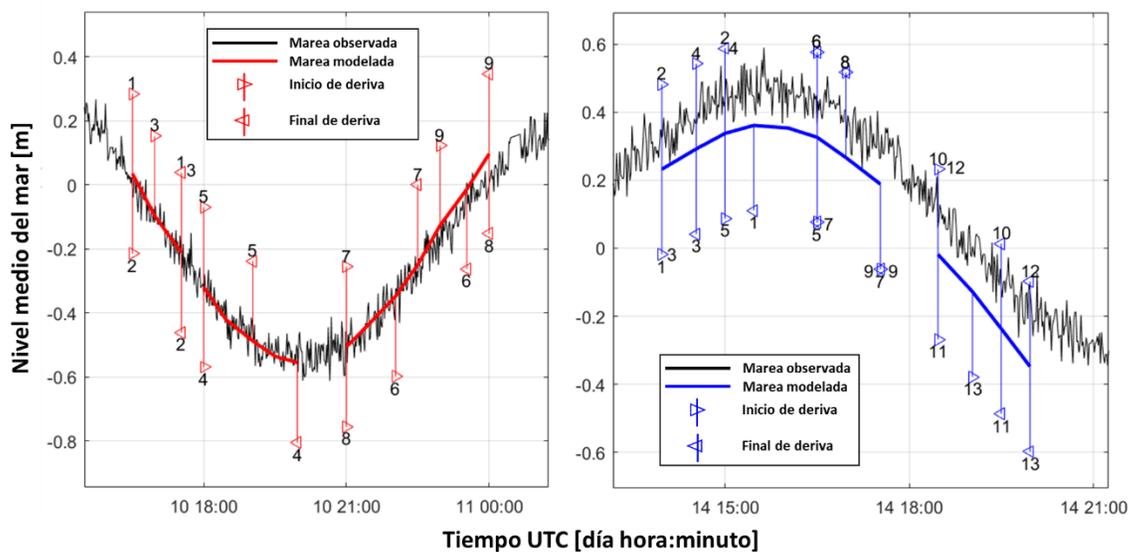


Figura 3. Periodos de medición con derivadores durante el 10 y 14 de septiembre de 2011.

En las Figuras 4 y 5 se muestran los valores de RPLO de las trayectorias de mejor desempeño entre las generadas mediante el desfase espaciotemporal, las que fueron comparadas con cada derivador medido los días 10 y 14 de septiembre, respectivamente, mientras que, el resumen para cada día analizado se muestra en las Tablas 1 y 2, respectivamente.

Para el día 10 de septiembre (Fig. 4) se puede apreciar que valores de RPLO menores a 0.2 representaron un mejor desempeño de las trayectorias observadas en la Figura 9. Los MHL superaron en desempeño a los MHG en 8 de 9 casos, 2 de ellos representados por FVCOM Marea (RPLO 0.111 y 0.034, 1D10 y 9D10, respectivamente); 2 representados por FVCOM Marea Det. (RPLO 0.001 y 0.01, 5D10 y 8D10, respectivamente); 2 representados por FVCOM Marea+Viento (RPLO 0.002 y 0.01, 3D10 y 6D10, respectivamente); 2 representados por FVCOM Viento Det. (RPLO 0.003 y 0.083, 2D10 y 4D10, respectivamente); y 1 por MULTIOBS (RPLO 0.010, 7D10).

La media diaria de $\overline{RPL0}$ registró el mayor desempeño con las trayectorias generadas mediante FVCOM Marea Det. (0.073), una desviación angular final de 39.8° , media de 33.3° y \overline{STD} de $\pm 24.9^\circ$, este modelo también registró la menor deferencia entre trayectorias modelada y observada (554.9 m). El análisis general del total de trayectorias generadas mediante el desfase espaciotemporal también arrojó el mayo desempeño asociado FVCOM Marea Det. con $\overline{RPL0}$ de 0.213, una desviación angular final de 71.6° , media de 68.9° , \overline{STD} de $\pm 34.6^\circ$ y diferencia de recorrido de 639 m.

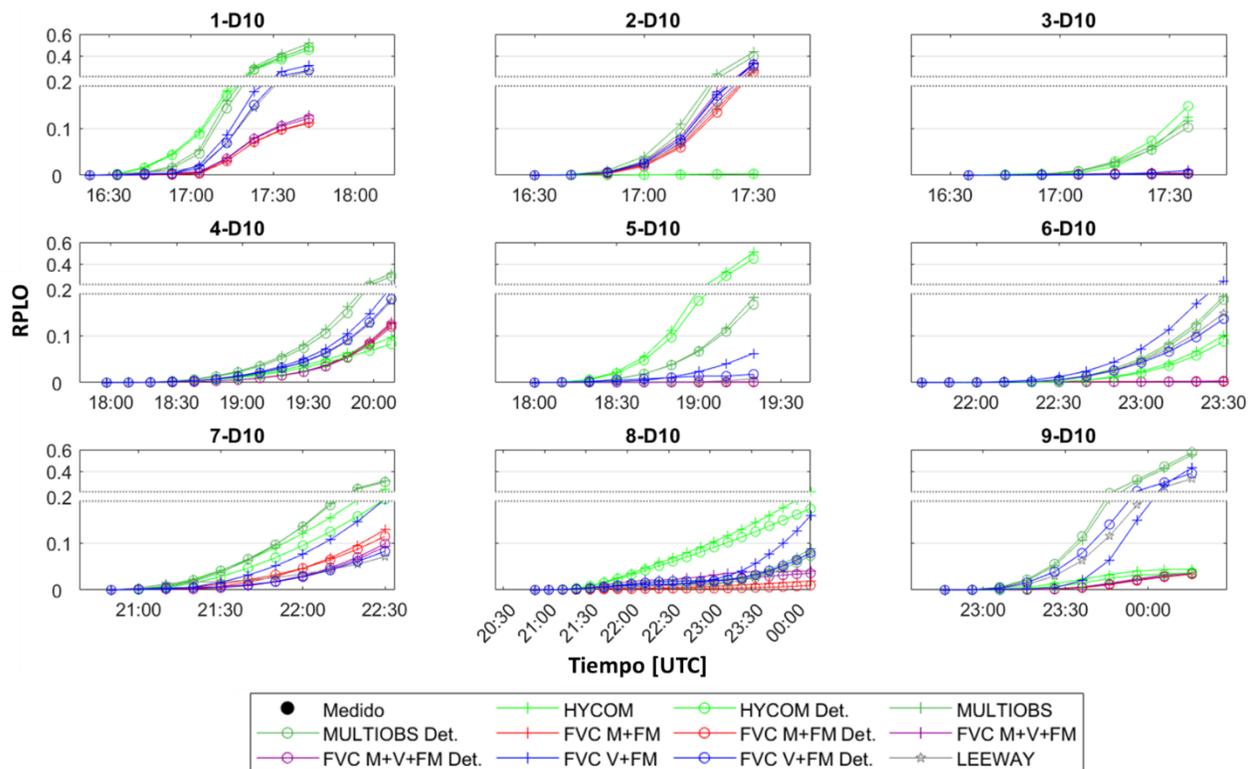


Figura 4. Valores de RPLO obtenido mediante la comparación de trayectorias observadas y modeladas durante el día 10 de septiembre de 2011.

Tabla 1. Valores medios de RPLO para cada modelo y escenario utilizado para el día 10 de septiembre de 2011.

10 de septiembre	Modelo	RPLO			Angulo (°)			Diferencia en recorrido (m)	NCLS Liu & Weisberg (2011)
		Final	Media	STD	Final	Mean	STD		
Trayectoria de mejor RPLO	FVC M	0.077	0.024	0.028	39.3	30.7	8.1	607.3	3.173
	FVC M Det.	0.073	0.023	0.027	39.8	33.3	6.6	554.9	3.126
	FVC M+V	0.085	0.027	0.031	35.3	33.6	10.4	572.4	3.299
	FVC M+V Det	0.08	0.025	0.03	31.9	24.9	8.3	601.9	2.86
	FVC V	0.2	0.07	0.072	58.3	61.3	11.5	984.8	4.31
	FVC V Det.	0.181	0.063	0.065	48.9	51.2	10.7	1014.9	4.032
	HYCOM	0.299	0.095	0.108	84.9	68.3	16.6	1101.4	4.67
	HYCOM Det.	0.283	0.09	0.103	84.7	68.1	15.4	1021.2	4.693
	MULTIOBS	0.15	0.047	0.053	44.3	40.8	12.8	1154.1	4.272
	MULTIOBS Det.	0.163	0.051	0.059	47.4	40.9	13	1090.8	4.041
LEEWAY	0.216	0.061	0.077	68.1	43.8	19	1228.9	4.382	
Media de todas las trayectorias desfasadas	FVC M	0.22	0.072	0.096	71.6	69.1	34.9	661.5	4.795
	FVC M Det.	0.213	0.07	0.093	71.6	68.9	34.6	639.6	4.781
	FVC M+V	0.225	0.074	0.097	71.8	69.8	34.7	663.8	4.855
	FVC M+V Det	0.219	0.072	0.094	71.7	69.5	34.3	642.4	4.844
	FVC V	0.412	0.143	0.151	106.4	113.7	33.9	1108.2	5.467
	FVC V Det.	0.416	0.144	0.154	106.3	112.8	35.9	1129.2	5.415
	HYCOM	0.379	0.126	0.13	99.8	91.9	21.9	1131.2	4.995
	HYCOM Det.	0.361	0.119	0.124	97.8	89.2	20.8	1080.2	5.001
	MULTIOBS	0.372	0.124	0.148	94.7	90.8	38.8	1159.6	5.078
	MULTIOBS Det.	0.358	0.119	0.141	94	88.6	35.9	1119.1	5.078
LEEWAY	0.34	0.11	0.119	88	78.7	26	1254	4.833	

Para el día 14 de septiembre (Fig. 5) se puede apreciar nuevamente que valores de RPLO menores a 0.2 representaron un mejor desempeño de las trayectorias observadas, aunque, en este caso, se registró una menor cantidad de desempeños que excedieron dicho límite y en la mayoría de los casos se registraron valores menores a 0.05 de RPLO. Los MHL superaron en desempeño a los MHG en 9 de 13 casos, 3 de ellos representados por FVCOM Marea De. (RPLO 0.005, 0.001 y 0.001, 8D14, 10D14 y 12D14, respectivamente); 2 representados por FVCOM Marea (RPLO 0.012 y 0.002, 6D14 y 9D14, respectivamente); 2 representados por FVCOM Viento Det. (RPLO 0.004 y 0.002, 1D14 y 5D14, respectivamente); 2 representados por MULTIOBS (RPLO 0.052 y 0.005, 2D14 y 7D14, respectivamente) y Los modelos FVCOM Marea+Viento Det., FVCOM Viento, HYCOM Det. y MULTIOBS Det. representaron el mejor desempeño en los derivadores 11D14, 1D14, 3D14 y 13D14, respectivamente (RPLO de 0.001, 0.004, 0.002 y 0.001, respectivamente).

La media diaria de $\overline{RPL0}$ registró el mayor desempeño con las trayectorias generadas mediante MULTIOBS (0.025), una desviación angular final de 7.9° , media de 7.8° y \overline{STD} de $\pm 5.2^\circ$, su diferencia entre trayectorias modelada y observada fue de 988.7 m. El análisis general del total de trayectorias generadas mediante el desfase espaciotemporal también arrojó el mayor desempeño asociado MULTIOBS, en este caso evaluado mediante el esquema Determinístico, con $\overline{RPL0}$ de 0.164, una desviación angular final de 40.2° , media de 42.7° , \overline{STD} de $\pm 27.3^\circ$ y diferencia de recorrido de 1043.9 m.

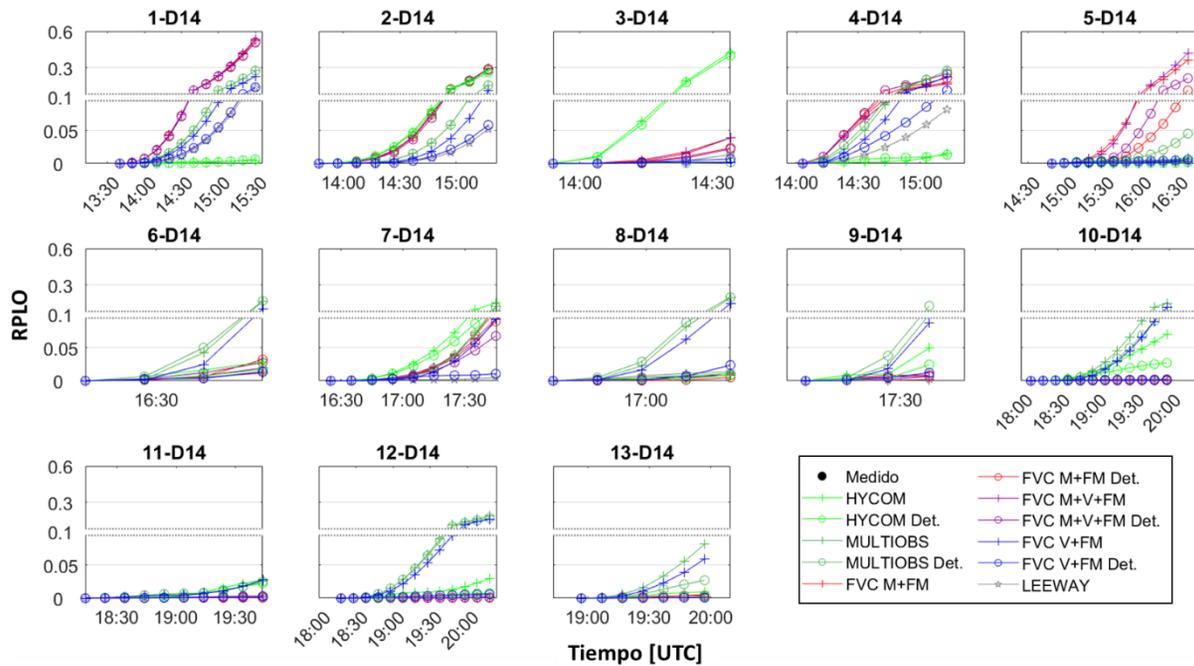


Figura 5. Valores de RPLO obtenido mediante la comparación de trayectorias observadas y modeladas durante el día 14 de septiembre de 2011.

Tabla 2. Valores medios de RPLO para cada modelo y escenario utilizado para el día 14 de septiembre de 2011.

14 de septiembre	Modelo	RPLO			Angulo (°)			Diferencia en recorrido (m)	NCLS Liu & Weisberg (2011)
		Final	Media	STD	Final	Media	STD		
Trayectoria de mejor RPLO	FVC M	0.118	0.041	0.041	45	43.2	5.5	851.9	3.607
	FVC M Det.	0.099	0.035	0.035	45.6	42.5	5.5	771.6	3.606
	FVC M+V	0.122	0.041	0.042	46.5	43.5	5.3	825.4	3.627
	FVC M+V Det.	0.107	0.037	0.037	44.5	41.9	7.4	789.7	3.369
	FVC V	0.086	0.032	0.033	32.1	33.2	7.3	1035.9	3.582
	FVC V Det.	0.07	0.026	0.028	21.8	24	5.6	1020.7	2.977
	HYCOM	0.134	0.048	0.052	41.5	31.9	11.6	1091.1	3.584
	HYCOM Det.	0.132	0.048	0.051	41.6	34.7	10.7	1005	3.458
	MULTIOBS	0.025	0.009	0.009	7.9	7.8	5.2	988.7	2.581
	MULTIOBS Det.	0.03	0.011	0.011	10.7	10.7	4.7	940.7	2.646
LEEWAY	0.106	0.037	0.041	33.9	24	10.6	1082.3	3.274	
Media de todas las trayectorias desfasadas	FVC M	0.426	0.165	0.176	112	112.5	36.7	870.6	5.572
	FVC M Det.	0.4	0.156	0.167	107.7	108.1	36.2	849.9	5.417
	FVC M+V	0.416	0.161	0.174	108.6	109	37.4	876.9	5.425
	FVC M+V Det.	0.395	0.154	0.166	104.7	104.9	36.7	855.1	5.293
	FVC V	0.27	0.105	0.111	68.5	75.1	28.8	1103.4	4.382
	FVC V Det.	0.237	0.094	0.101	58.2	66.5	29.6	1124.7	4.115
	HYCOM	0.234	0.091	0.087	60.8	60.2	22.6	1113.4	4.119
	HYCOM Det.	0.226	0.087	0.084	59.4	58.2	19.4	1055.4	4.107
	MULTIOBS	0.166	0.065	0.081	39.1	42.9	30.7	1090.7	3.387
	MULTIOBS Det.	0.164	0.064	0.075	40.2	42.7	27.3	1043.9	3.329
LEEWAY	0.2	0.078	0.076	52.4	51.9	21.5	1095.6	3.865	

El análisis cualitativo de desempeño (Fig. 6) fue realizado mediante la comparación de las trayectorias modeladas respecto a áreas donde se registraron hallazgos durante la emergencia SAR de la época (Fig. 1). Los resultados obtenidos a partir de los MHG muestran una tendencia hacia los polígonos ubicados al centro y Oeste de la isla Robinson Crusoe, mientras que, al aplicar el sistema determinístico, los arribos se desplazaron a los polígonos ubicados al Este de la isla (Fig. 6). El método LEEWAY mostró derivas hacia los polígonos del centro y Este de la isla (Fig. 6), con poco éxito en arribos a los polígonos destacados. Los escenarios utilizando el MHL mostraron una distribución más variada de arribos.

El análisis de los arribos a los polígonos objetivos (Fig. 6), o zonas donde se registraron hallazgos registró el mayor desempeño mediante el uso de FVCOM-Marea Determinístico (7 polígonos), seguido por FVCOM-Marea+Viento Directo y FVCOM-Viento Determinístico (6 polígonos, respectivamente), y FVCOM-Marea+Viento Determinístico (5 polígonos). El resto de los escenarios mostró arribos en a lo más 4 polígonos. La aplicación del método determinístico generó una mejora en la distribución de los arribos en la mayoría de los casos ejecutados con FVCOM (Fig. 6), aumentando su distribución espacial y en algunos casos, aumentando su arribo en los polígonos objetivos, particularmente en el caso de FVCOM-Marea.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

La metodología aplicada en el presente estudio tiene varias aristas a discutir, debido a la aplicación de variadas fuentes de información y metodologías de estimación de trayectorias. Si bien, fue posible determinar su desempeño por separado (forma directa y LEEWAY) y conjugado (determinístico), el error en el desempeño estimado finalmente es una sumatoria de los errores asociados a la modelación numérica; la interpolación de datos puntuales; las simplificaciones asociadas al balance de fuerza del método determinístico, los desfases espaciotemporales asumidos y a la aproximación explícita para la resolución de la EDO de la trayectoria de partículas.

Para comprender de mejor forma la proporción del error en el desempeño, podemos asumir que el error asociado a la resolución de la EDO mediante el algoritmo Runge-Kutta el error debido a la interpolación puntual de datos y el error inducido por desfase espaciotemporal es proporcional para todos los escenarios estudiados, dado que fue aplicado de forma indistinta para cada caso. Así también el error asociado a las simplificaciones del método determinístico fue proporcional a todos los escenarios en los cuales fue aplicado y puede ser comparado al error de desempeño mediante aplicación directa, dado que utilizan las mismas fuentes de información, siendo este último, el error más próximo a la fuente de información.

Para una buena interpretación de los resultados, es necesario considerar las condiciones locales del área en la cual se realizaron los estudios mediante derivadores. La zona entre isla Santa Clara e isla Robinsón Crusoe se caracteriza por presentar corrientes con influencia mareal del tipo reversible, con flujo hacia el Sureste y refluo hacia el NW cuando se presentan vientos con intensidad $< 2 \text{ m s}^{-1}$, pero cuando existen vientos mayores y sostenidos desde el Noroeste, la corriente superficial presenta una dirección predominante hacia el Sureste (SHOA, 2013).

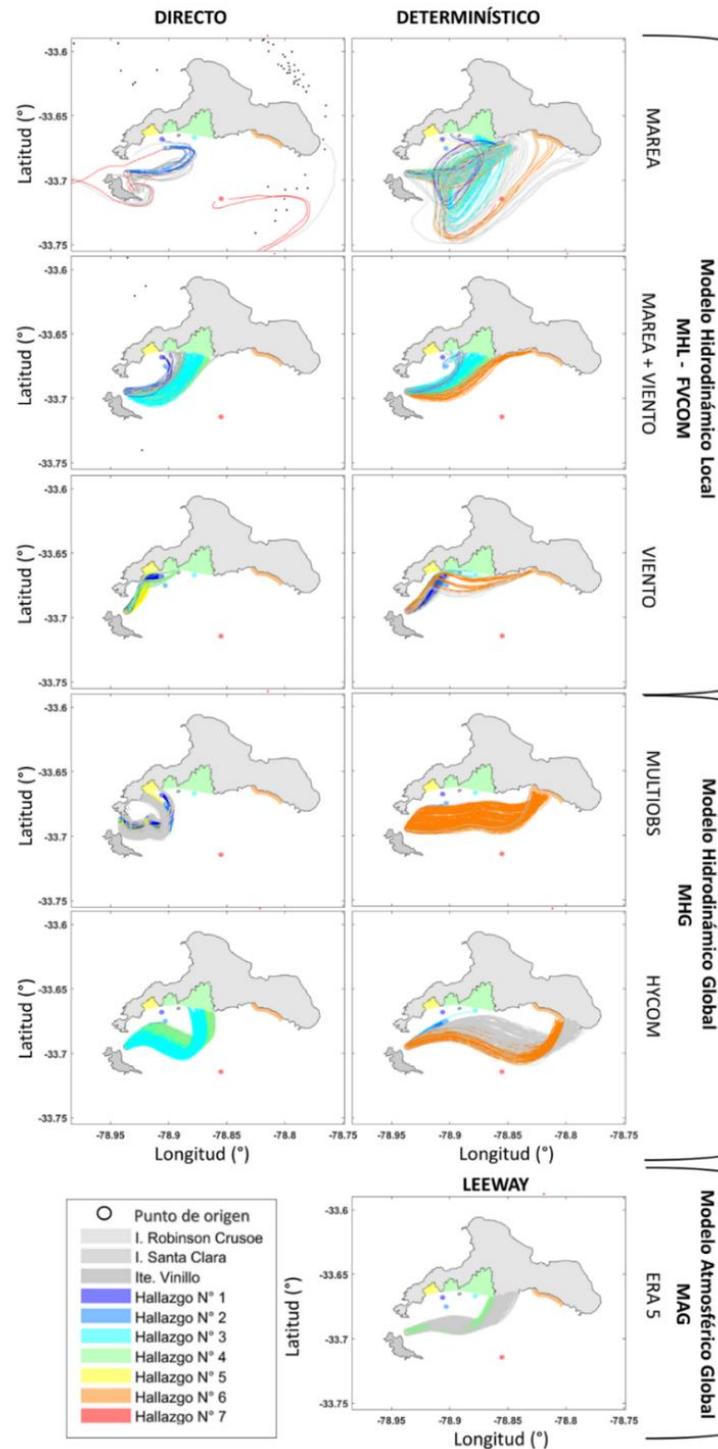


Figura 6. Trayectoria de partículas durante la emergencia SAR (MHL, MHG y LEEWAY) entre el 02 y 08 de septiembre de 2011.

El comportamiento reversible de las corrientes en el canal fue capturado por los escenarios modelados con FVCOM forzado con Marea y Marea+Viento, quedando en manifiesto en las mediciones de desempeño cualitativas y cuantitativas, aunque el día 14 de septiembre fue superado por el modelo MULTIOBS, día en el que la influencia del viento fue mayor, alcanzando intensidades de 5.2 m s^{-1} desde NW, lo que generó que las trayectorias en fase de marea vaciante, que debiesen haberse dirigido hacia el W, fuesen en sentido contrario (SE), coincidente con los antecedentes históricos del lugar. A pesar de lo anterior, el escenario FVCOM Viento obtuvo resultados muy cercanos a los obtenidos mediante MULTIOBS, lo cual induce la idea de que, el método de forzado diferenciado, Marea, Viento+Marea y Viento, a diferencia de los MHG, permite capturar las condiciones dinámicas que se pueden presentar un área particular. Cabe señalar que durante el día 14 de septiembre, el método LEEWAY alcanzó sus mayores desempeños, sin embargo, particularmente en este caso, su principal desventaja fue la asociación con el elemento flotante, desconocido en primera instancia o, por ejemplo, en el presente estudio, sin parámetros tabulados.

La zona entre isla Santa Clara e isla Robinson Crusoe, dadas las condiciones orografía del área y en presencia de condiciones adversas de viento (como las reportadas durante el accidente), pueden dar lugar a inestabilidades atmosféricas, fuertes turbulencias y flujos verticales, condiciones que además cambian abruptamente en cortos periodos de tiempo y que según Gracia (2017), y que dieron el origen al accidente del avión C-212. Si se considera además que, la isla Robinson Crusoe posee un ancho máximo de $\sim 15 \text{ km}$, tanto el MAG como el MHG MULTIOBS, no son capaces de resolver sus balances incluyendo el efecto orográfico de la isla, y su resolución temporal no permite representar la variabilidad de alta frecuencia de los vientos y las rachas existentes en la zona del canal entre isla Santa Clara e isla Robinson Crusoe. Esto sugiere que, para mejorar estos aspectos, es recomendable acoplar un modelo atmosférico de alta resolución para ser ingresada como condición de borde al modelo FVCOM.

Respecto al uso del método determinístico, se registraron diferencias poco evidentes en termino de desplazamiento en el corto plazo, pero significativas cuando fueron evaluadas las medias diarias en el análisis cuantitativo, obteniendo en la mayoría de los casos mejores desempeños mediante el uso de este esquema. Las diferencias quedaron en manifiesto cuando se realizó el análisis cualitativo de las trayectorias, donde se presentaron mejoras significativas en los resultados mediante MHL, particularmente del escenario FVCOM Marea Det., pudiendo relacionar su efecto al tiempo de análisis de las derivas.

Es importante considerar la resolución temporal y espacial de los MHG, en perspectiva a la duración de las mediciones, donde para cortos periodos de tiempo (menor a 2 días) (Sutherland *et al.*, 2020), es recomendable reproducir el movimiento en una alta frecuencia. los MHL generalmente producen estructuras de mesoescala de mayor definición, sin embargo, también suelen contener efectos de menor escala que no están presentes en la realidad o desplazados en el espacio o tiempo (Sperrevik *et al.*, 2017 Mourre *et al.*, 2018, Aguiar *et al.*, 2020; Révelard *et al.*, 2021), además, los modelos de alta resolución tienden a crear dinámicas mucho más energéticas (Révelard *et al.*, 2021), favoreciendo el desplazamiento y separación de las trayectorias. Esto fue contrarrestado induciendo un error en forma de desfase espaciotemporal en el inicio de las trayectorias, sin embargo, sigue siendo una incerteza que solo puede ser dilucidada mediante la comparación con trayectorias medidas y la estimación de medidas de desempeño tales como el RPLO, NCLS y SS, convirtiendo a las mediciones mediante derivadores de aspecto conocido, en una fuente de información invaluable ante este tipo de emergencias.

REFERENCIAS

Aguiar, E., Mourre, B., Juza, M., Reyes, E., Hernández-Lasheras, J., Cutolo, E., *et al.* (2020). Multi-platform model assessment in the Western Mediterranean Sea: impact of downscaling on the surface circulation and mesoscale activity. *Ocean Dynam.* 70, 273–288. doi: 10.1007/s10236-019-01317-8

Allen, A. A. (2005). Leeway Divergence Report, Tech. rep., US Coast Guard Research and Development Center, 2082 Shennecossett Road, Groton, CT, USA, CMEMS-MOB-QUID-015-004: <http://marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-MOBQUID-015-004.pdf>.

Celia, M.A. & Gray, W.G., (1992). *Numerical Methods for Differential Equations*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 436 pp.

Chassignet, E.P., H.E. Hurlburt, E.J. Metzger, O.M. Smedstad, J.A. Cummings, G.R. Halliwell, R. Bleck, R. Baraille, A.J. Wallcraft & C. Lozano, (2009): US GODAE Global Ocean Prediction with the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM). *Oceanography* vol 22, 64-75.

Chen C., H. Liu & R. Beardsley, (2003). An unstructured, finite-volume, three-dimensional, primitive equation ocean model: application to coastal ocean and estuaries, *J. Atmos. Oceanic Technol.* 20 159–186.

Chen, C., Limeburner, R., & members of the UMASS-D FVCOM Group. *et al.* (2012). FVCOM model estimate of the location of Air France 447. *Ocean Dynam.*, 62, 943–952. <https://doi.org/10.1007/s10236-012-0537-5>.

Chen C., Beardsley R.C., Cowles G., Qi J., Lai Z., Gao G., *et al.* (2013). *An Unstructured-Grid, Finite-Volume Community Ocean Model FVCOM User Manual: SMAST/UMASSD Technical Report-13-0701* (third ed.), University of Massachusetts-Dartmouth (2013), pp. 404.

Cho, K.-H., Li, Y., Wang, H., Park, K.-S., Choi, J.-Y., Shin, K.-I., & Kwon, J.-I. (2014). Development and Validation of an Operational Search and Rescue Modeling System for the Yellow Sea and the East and South China Seas. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 31(1), 197–215. doi:10.1175/jtech-d-13-00097.1.

Di Maio, A., Martin, M. V., & Sorgente, R. (2016). Evaluation of the search and rescue LEEWAY model in the Tyrrhenian Sea: a new point of view. *Nat. Hazards Earth Syst.*, 16(8), 1979–1997. doi:10.5194/nhess-16-1979-2016

Egbert, G.D., & S.Y. Erofeeva, (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 19(2), 183-204.

Gracia (2017). Links for a successful investigation: C-212 Robinson Crusoe Island Accident Case. Airbus Defense & Space. Military Aircraft.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., *et al.* (2020). The ERA5 global reanalysis. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, online first, <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

Hufford, G. & S. Broida, (1976). Estimation of the leeway drift of small craft. *Ocean Engng.*, 3 (3), 123–132, doi:10.1016/0029-8018(76)90028-7.

Hunke, E.C. & W. Lipscomb, (2008). CICE: The Los Alamos sea ice model, documentation and software user's manual, version 4.0. Tech. rep. LA-CC-06-012, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM. (<http://oceans11.lanl.gov/drupal/CICE>).

Mourre, B., Aguiar, E., Juza, M., Hernández-Lasheras, J., Reyes, E., Heslop, E., *et al.* (2018). "Assessment of high-resolution regional ocean prediction systems using multi- platform observations: Illustrations in the Western

Mediterranean Sea," in *New Frontiers in Operational Oceanography*, eds E. P. Chassignet, A. Pascual, J. Tintorei, & J. Verron (Tallahassee, FL: GODAE OceanView), 815. doi: 10.17125/gov2018.ch24

Révelard A, Reyes E, Mourre B, Hernández-Carrasco I, Rubio A, Lorente P, Fernández CDL, Mader J, Álvarez-Fanjul E. & J. Tintoré, (2021). Sensitivity of Skill Score Metric to Validate Lagrangian Simulations in Coastal Areas: Recommendations for Search and Rescue Applications. *Front. Mar. Sci.* 8:630388. doi: 10.3389/fmars.2021.630388

Rio, M.-H., S. Mulet, & N. Picot, (2014). Beyond GOCE for the ocean circulation estimate: Synergetic use of altimetry, gravimetry, and in situ data provides new insight into geostrophic and Ekman currents, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2014GL061773.

Rojas, R. & N. Silva, (1996). *Atlas Oceanográfico*, Vol. 1 (18° 21' S a 50° 00' S), Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, Valparaíso, Chile.

Serra, M., Sathe, P., Rypina, I. *et al.*, (2020). Search and rescue at sea aided by hidden flow structures. *Nat. Commun.*, 11, 2525. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16281-x>.

Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, (1999). *Instrucciones Oceanográficas N° 2: Método oficial para el cálculo de los valores No Armónicos de la marea*, 2° Edición. Publicación 3202.

Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, (2013). *Derrotero de la costa de Chile. Volumen I. De Arica a Canal Chacao*, 10° Edición. Pub. SHOA 3001.

Sperrevik, A.K., Röhrs, J., and KH. Christensen, (2017). Impact of data assimilation on Eulerian versus Lagrangian estimates of upper ocean transport. *J. Geophys. Res. Oceans* 122, 5445–5457. doi: 10.1002/2016JC012640

Sutherland, G., Soontiens, N., Davidson, F., Smith, G.C., Bernier, N., Blanken, H., Schillinger, D., Marcotte, G., Röhrs, J., Dagestad, K.F, *et al.* (2020). Evaluating the Leeway Coefficient of Ocean Drifters Using Operational Marine Environmental Prediction Systems. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 37, 1943–1954

Villalón, L. (2014). *Assessment of the power potential extraction in the chilean chacao channel* (Tesis para optar al grado de Magister). Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago.