

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

MODELACIÓN HIDRODINÁMICA Y DERIVA DE PARTÍCULAS COMO SISTEMA DE SOPORTE EN CASOS DE BÚSQUEDA Y RESCATE MARÍTIMO (SAR): APLICACIÓN AL ACCIDENTE AÉREO DEL AVIÓN C-212, 2 DE SEPTIEMBRE DE 2011, ARCHIPIÉLAGO DE JUAN FERNÁNDEZ, CHILE.

PABLO CÓRDOVA M.¹
RAUL FLORES A.²

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. Entre las más complejas de atender se encuentran las emergencias SAR marítimas. Según estadísticas de COSPAS-SARSAT del 2019, un 38% de los casos totales corresponden a casos marítimos. El servicio SAR marítimo de Chile a cargo de la DIRECTEMAR, se activó 738 veces durante el año 2020, registrando 13 muertes, 26 desapariciones, 4 heridos y 695 ilesos dentro del área de responsabilidad marítima SAR de Chile, zona que abarca 24.476.004,5 km². En el presente estudio, se pusieron a prueba variados modelos hidrodinámicos y métodos numéricos para estimar la deriva de elementos flotantes liberados en el momento de un accidente real, específicamente el ocurrido el 2 de septiembre de 2011, evento en el que el avión C-212 de la FACH cayó al mar entre isla Santa Clara e isla Robinsón Crusoe, Chile. Los resultados demuestran que, la modelación hidrodinámica acoplada a un modelo de deriva de partículas son un soporte válido para eventuales emergencias SAR, además, la redundancia de metodologías ofrece una amplia cobertura ante los diferentes escenarios que se puedan dar en la naturaleza. Este trabajo es el primer aporte científico en Chile enfocado a casos de emergencia SAR, y tiene como finalidad, dar el primer paso hacia la generación de un sistema integrado con la capacidad de dar soporte de forma rápida y eficaz, a las autoridades encargadas de coordinar las emergencias SAR marítimas.

¹ Oceanógrafo, Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada – pablo.cordova.m@mail.pucv.cl

² Profesor Asistente, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – 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 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 llevar a cabo, donde la adquisición de datos y la generación de pronósticos, en un tiempo óptimo, se vuelve crítico. A nivel internacional, existen variados estudios sobre el uso de modelos hidrodinámicos en casos de emergencia SAR, donde se puede destacar el trabajo de Chen *et al.* (2012), en el que se utilizó el modelo FVCOM para estimar la ubicación del accidente del avión Air France 447 accidentado en junio de 2009, en el Océano Atlántico Ecuatorial.

El día del accidente, el avión Casa 212 Aviocar, donde viajaban 21 personas entre pasajeros y tripulantes, fue autorizado a realizar un vuelo de apoyo a las labores de reconstrucción producto del terremoto del 27 de febrero de 2010 a 150 km al noroeste de Concepción, Chile. Tanto en el trayecto como en la llegada, se presentaron condiciones meteorológicas adversas, con fuertes rachas de viento, dificultando el aterrizaje en un primer y segundo intento y obligando la remontada del avión. A las 16:53 (19:53 UTC) el jefe de la torre de control pierde contacto visual y radial con la aeronave, cuando esta volaba entre la isla Santa Clara e isla Robinson Crusoe. Se presume que el avión se estrelló en el mar debido a una entrada en pérdida alrededor de las 16:55 (19:55 UTC). Las corrientes en el área entre isla Santa Clara e isla Robinsón Crusoe, muestran que con viento < 7 km/h, la corriente de marea presenta un flujo hacia el Sureste y reflujo hacia el NW, pero con vientos mayores y sostenidos desde el Noroeste, la corriente superficial presenta una dirección predominante hacia el Sureste (Pub. SHOA 3001).

Un sistema de soporte ante eventuales emergencias SAR marítimas, debe funcionar tanto con información instrumental como con información óptimamente interpolada o modelada numéricamente, y debe generar productos operativos, claros, en un tiempo óptimo e idealmente redundar en fuentes de información y métodos de procesamiento. Tomando en cuenta las necesidades descritas anteriormente, se propuso un flujo de procesos en diferentes escalas, desde las fuentes globales y análisis simplificados, hasta el uso de modelación local y análisis determinísticos para la estimación de trayectorias de elementos flotantes. Se espera que los resultados del presente trabajo sean un aporte y sirvan de incentivo a las autoridades a cargo de los operativos de emergencias SAR marítimas en Chile, para finalmente, aunar los criterios necesarios para el desarrollo de herramientas de soporte de mayor escala y capacidad.

2. METODOLOGÍA

2.1. Zona de estudio y Antecedentes del accidente

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 (Pub. SHOA 3001) (Fig. 1).

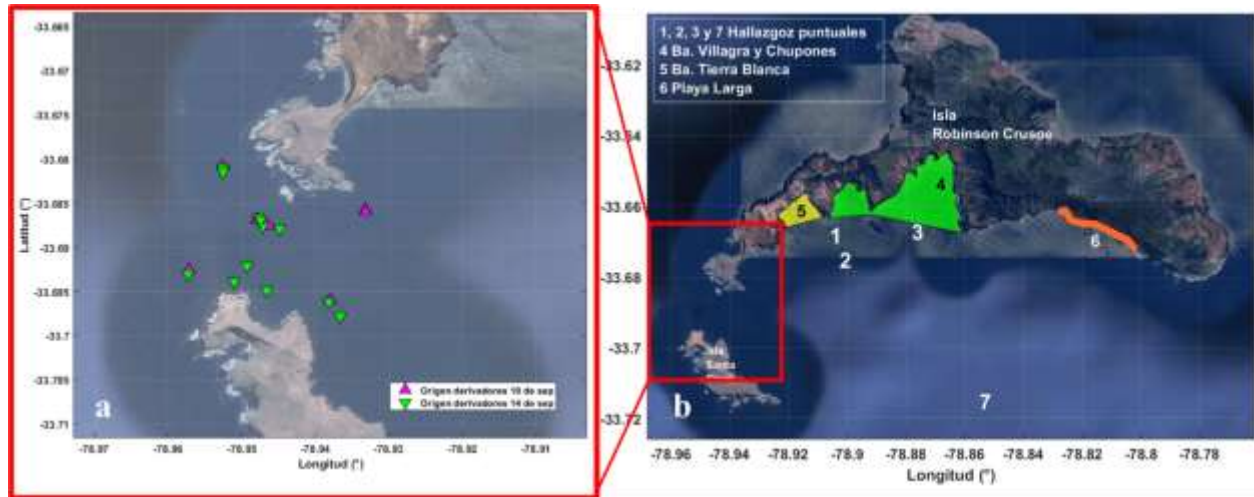


Figura 1. Zona de estudio: a) ubicación de los lances de derivadores (10 y 14 de septiembre 2011); b) Ubicación geográfica de los hallazgos recopilados por la Armada de Chile y la FACH.

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, tanto en marea llene como vaciante. La ubicación de los lances superficiales se muestra en la Figura 1a. Otros datos de control fueron obtenidos mediante solicitud de datos por transparencia pública a la Armada de Chile y la FACH, los cuales se indican en la Tabla 1 y Figura 1b.

Tabla 1. Descripción de los hallazgos recopilados por la Armada de Chile y la FACH.

Institución	Fecha	HRI (UTC)	N°	Hallazgo	Referencia geográfica	
					Latitud	Longitud
FACH	03 de sep.	0:40	1	Puerta	-33.668	-78.906
Armada de Chile	3 de sep.	9:50	2	Puerta Trasera	-33.675	-78.903
			3	Asiento	-33.667	-78.878
			SN	Balsa salvavidas sin activar	A 1 MN de la línea que une el islote Vinillo con islote Chamelos	
	4	Otros	Área definida entre bahía Villagra cerrado por punta Blanco Islote Vinillo - punta Hueca (CN SHOA 5410)			
	6 de sep.	Sin hora	5	Restos humanos	al interior de la bahía Tierra Blanca Playa Larga	
7 de sep.	7:55	7	restos humanos	-33.715	-78.855	

Según datos de la Dirección meteorológica de Chile (DMC), complementados con datos del modelo ERA5, entre el 2 y el 8 de septiembre de 2011, se presentaron intensidades de viento promedio de 15 km/h con dirección predominante del Noroeste e intensidades que superaron los 30 km/h desde el Sur el día 4 de septiembre. El día 10 la intensidad del viento fue en descenso, desde 35 km h⁻¹ hasta 5 km h⁻¹ al final del día, virando desde Sur a Norte, mientras que el día 14, la intensidad fue en aumento, desde 5 km h⁻¹ hasta 9 km h⁻¹ al final del día, con dirección predominante Noroeste.

2.2. Modelos Hidrodinámicos Globales (MHG) y Atmosférico

Para el análisis de la emergencia SAR de septiembre de 2011, se utilizaron los datos de corrientes superficiales del modelo GOFS 3.1 (identificado como HYCOM) del Centro de Estudios de Predicción Océano-Atmosférico (COAPS por sus siglas en inglés), de Estados Unidos. La resolución espacial y temporal resultante de modelo MULTIOBS es de 0.08° ($1/12^\circ$) y 3 horas, respectivamente.

También fueron utilizados los datos de corrientes superficiales del modelo MULTIOBS_GLO_PHY_REP_015_004 (identificado como MULTIOBS) (Rio *et al.*, 2014), producidos 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 resultante de modelo MULTIOBS es de 0.25° ($1/4^\circ$) y 3 horas, respectivamente.

Para la incorporación del viento, como forzante en la ejecución del MHL y su influencia en la estimación de la deriva de los elementos flotantes, se utilizaron datos del modelo atmosférico ERA5 (Hersbach *et al.*, 2020).

2.3. Modelo Hidrodinámico Local (MHL) – FVCOM

FVCOM (Finite-Volumen Community Ocean Model) es un modelo tridimensional, de grilla no estructurada, desarrollado originalmente por Chen *et al.* (2003). La selección del modelo FVCOM se basó en la metodología de volumen finito, permitiendo una mayor flexibilidad geométrica y eficiencia computacional (Chen *et al.*, 2013). Esta representación numérica implica una mejor representación de la conservación de momentum en áreas costeras de geometría compleja (Chen *et al.*, 2013).

La batimetría utilizada fue una conjunción entre datos provenientes de mediciones realizadas por el SHOA y datos de GEBCO (2020). Con esta información 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 (Fig 2).

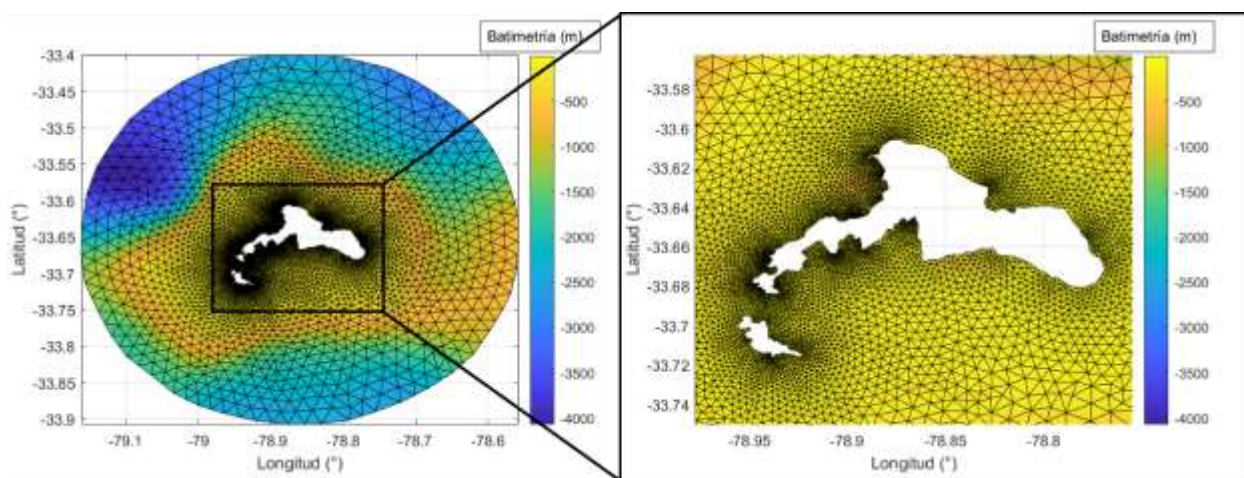


Figura 2. Grilla batimétrica utilizada para la modelación con FVCOM.

Una vez generada la grilla, se seleccionaron nodos para la incorporación de las condiciones frontera y nodos esponja, que cumplen la función de evitar que la energía se acumule y propague desde la frontera del modelo hacia el interior y se definieron 20 capas sigma en profundidad.

Los parámetros utilizados como forzante corresponden a datos de flujo medio, estimados a partir de los resultados del modelo MULTIOBS, incorporados en todos los niveles sigma de cada nodo de condición frontera; los datos de marea del modelo TPXO (Egbert *et al.*, 2002) incorporados a nivel superficial en los nodos de condición frontera y los datos de viento resultantes del modelo ERA5, incorporados en cada nodo superficial de la grilla.

El modelo fue configurado para obtener datos a partir de 10 días antes del momento del accidente, periodo utilizado para la estabilización. La resolución temporal de cálculo interno del modelo se configuro cada 1 s, mientras que la resolución de salida fue cada 30 min. Para evaluar el comportamiento del modelo, bajo las condiciones locales de la zona de estudio, se realizó un forzamiento separado en escenarios, forzado solo con marea, solo con viento y con marea y viento en conjunto.

2.4. Modelo de Deriva de Partículas (MDP)

Para evaluar las trayectorias de los elementos flotantes medidos y hallados durante la emergencia SAR, se desarrolló un Modelo de Deriva de Partículas (MDP), donde se resolvió la ecuación diferencial ordinaria (1), utilizando el esquema numérico Explícito Runge-Kutta de 4 orden (Chen *et al.*, 2013), considerando una posición inicial conocida de la partícula $\vec{x}(t)$ y una velocidad del objeto \vec{v}_{ob} como referencia:

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

Dicha velocidad del objeto (\vec{v}_{ob}) fue aplicada mediante tres diferentes métodos. El método directo, en el que, la velocidad empleada fue igual a la velocidad interpolada desde los campos de corriente de los MHG y el MHL. El método determinístico, aplicado según el trabajo de Antonia Di Maio *et al.* (2016), en el que la velocidad aplicada, correspondió a la velocidad de objeto obtenida a partir de la ecuación (2), de balance de las fuerzas de arrastre actuando sobre el objeto (\vec{v}_{ob}):

$$F_p + F_A + F_{ADw} + F_{ADa} = 0 \quad (2)$$

donde F_p es el peso del objeto; F_A las fuerzas de boyantes del objeto; F_{ADw} es la fuerza de arrastre de agua sobre el objeto y F_{ADa} es la fuerza de arrastre de aire sobre el objeto. La ecuación (2) se resolvió solo en la horizontal, asumiendo que el peso del elemento y su boyantes se encuentran en equilibrio, resultando en la siguiente ecuación (3):

$$\frac{1}{2} C_{Dw} \rho_w A_s (\vec{v}_c - \vec{v}_{ob}) + \frac{1}{2} C_{Da} \rho_a A_E (\vec{v}_a - \vec{v}_{ob}) = 0 \quad (3)$$

donde: C_{Dw} es el coeficiente de arrastre del objeto bajo el agua; ρ_w es la densidad del agua; A_s es el área sumergida del objeto; \vec{v}_c es la velocidad de la corriente; C_{Da} es el coeficiente de arrastre del

objeto emergido; ρ_a es la densidad del aire; A_E es el área emergida del objeto y \vec{v}_a es la velocidad del viento.

Finalmente, 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. En este método, se estiman la componente vertical (Downwind, DWL) y cruzada (Crosswind, CWL) de deriva, en función de una velocidad conocida del viento a 10 m de altura (Allen, 2005), para varias categorías de objetos. Las ecuaciones (4) y (5) (Di Maio *et al.*, 2016) fueron utilizadas para estimar las componentes LEEWAY:

$$DWL = (a_d + \epsilon_d)W_{10} + b_d + \epsilon d \quad (3)$$

$$CWL = \pm(\pm a_d + \epsilon_d)W_{10} \pm b_d + \epsilon d \quad (4)$$

donde a_d es la tasa LEEWAY (%); ϵ_d es el residual de la regresión y b_d es el intercepto de la regresión. Dado que la componente CWL actúa en sentido positivo y negativo, CWL fue reemplazada por un paso aleatorio de distribución normal, el cual fue aplicado igualmente y de manera independiente del método para la estimación de trayectorias, resultando la componente DWL como la \vec{v}_{ob} . Los valores de a_d , ϵ_d y b_d , fueron obtenidos a partir de mediciones empíricas para múltiples categorías de elementos (Allen, 2005).

2.5. Análisis de casos

Mediante el presente estudio se generaron variados casos dependientes de los modelos y métodos utilizados para la estimación de trayectorias de partículas, los cuales se indican en la Figura 3.

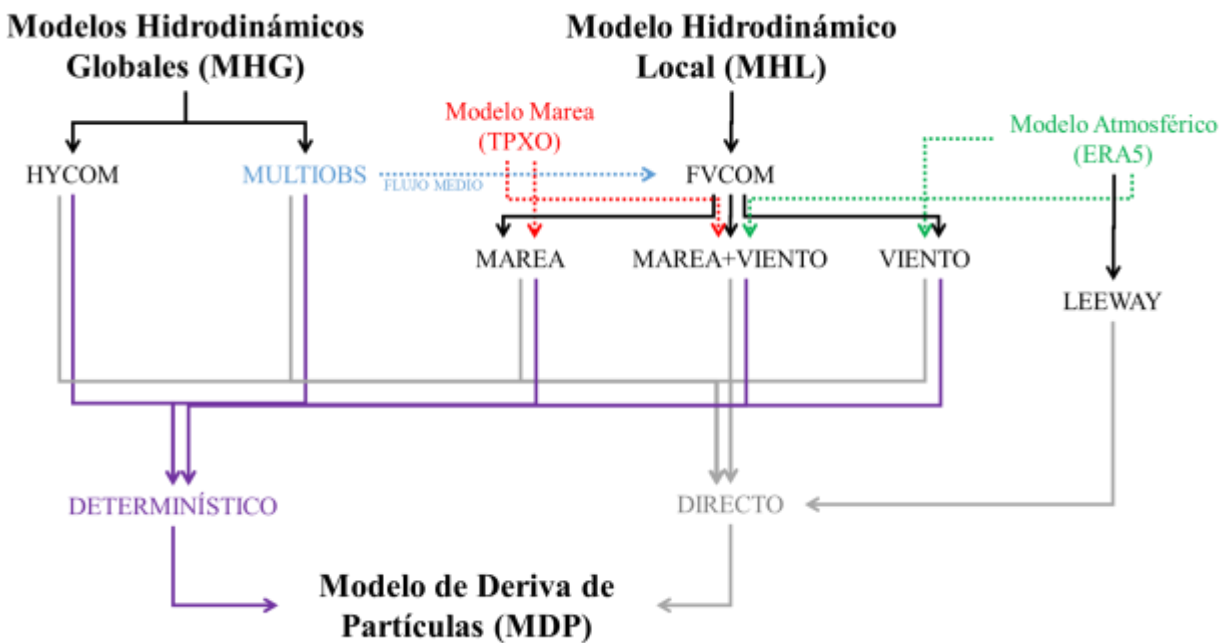


Figura 3. Flujo de procesos desde los Modelos globales y locales hasta el Modelo de deriva de partículas.

2.6. Evaluación mediante derivadores medidos el 10 y 14 de septiembre de 2011.

Durante la campaña de mediciones realizadas por el SHOA los días 10 y 14 de septiembre posterior al accidente, se liberaron derivadores superficiales en diferentes áreas entre isla Santa Clara e isla Robinson Crusoe (Figs. 1a y 4).

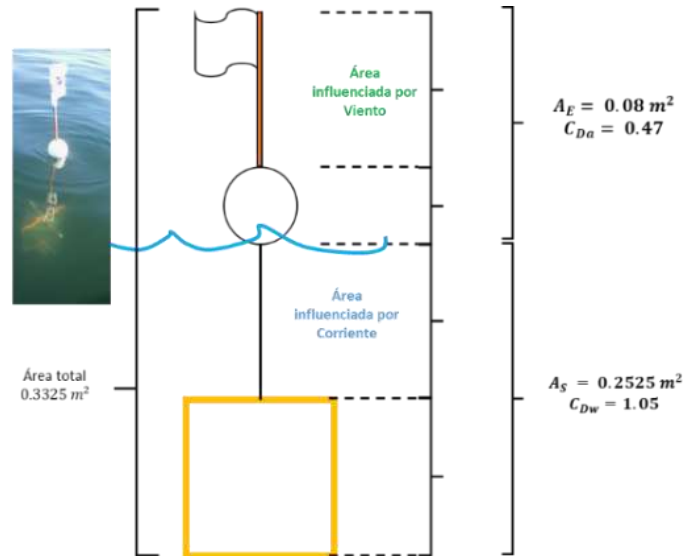


Figura 4. Esquema de los derivadores liberados por el SHOA (10 y 14 de sep. 2011)

A partir del diagrama indicado en la Figura 4, se estimaron, para el análisis determinístico, los parámetros área emergida (0.08 m^2) y sumergida (0.25 m^2). Los coeficientes de arrastre se definieron mediante su volumetría y geometría, asumiendo que fue transportado por un flujo laminar (Re de 10^4) (Di Maio *et al.*, 2016), para una esfera en superficie (0.47) y un cuadrado sumergido (1.05). Finalmente, para el análisis mediante LEEWAY se utilizaron los valores tabulados en Allen (2005), para una persona flotando en la superficie del mar, donde a_d correspondió a un 0,96%, b_d nulo y ϵ_d igual a 12 cm s^{-1} .

2.7. Evaluación de derivas desde el punto del accidente.

En este experimento, se liberaron un total de 260 partículas en un radio de 300 m alrededor del punto del accidente de coordenadas $33^\circ 24' 40.8'' \text{ S}$ y $70^\circ 56' 09.0'' \text{ W}$. Se liberaron partículas durante 6 hrs desde el momento del accidente y se evaluó el desplazamiento de estas durante los siguientes 6 días. Se aplicó un paso aleatorio de distribución normal y desviación no mayor al 20%. Para el método determinístico, se asumió un cilindro de 50 cm de alto por 50 cm de ancho y para el método LEEWAY se asumió nuevamente los parámetros de regresión (a_d , b_d y ϵ_d) de una persona flotando en el mar.

3. RESULTADOS

3.1. Validación de las trayectorias obtenidas para los días 10 y 14 de septiembre

Las comparaciones entre derivas medidas y modeladas durante las mediciones del 10 y 14 de septiembre se muestran en la Figura 5 y 6. Se utilizaron los datos de derivadores con al menos tres

mediciones de sus trayectorias. El análisis fue separado en desplazamiento Este-Oeste (E-O), desplazamiento Norte-Sur (N-S) y las componentes u y v de la velocidad.

Los resultados para el día 10 de septiembre muestra que, para su componente E-O, los mayores desempeños en RMS y correlación fueron registrados con el modelo LEEWAY (~675 m) y FVCOM forzado con marea-viento y deriva determinística (0.92), respectivamente, por su parte, el modelo LEEWAY mostró una diferencia mínima en desviación estándar (~323 m) respecto a la observada (Fig. 6). Para su componente N-S, los mayores desempeños en RMS y correlación fueron registrados con el modelo MULTIOBS con deriva determinística (~407 m) y FVCOM forzado con marea y deriva determinística (0.80), respectivamente. Finalmente, el modelo FVCOM forzado con marea-viento mostró una diferencia mínima en desviación estándar (~56 m) respecto a la observada (Fig. 6). Durante este día, las comparaciones de las componentes de velocidad arrojaron valores bajos de desempeño, pudiendo destacar solo el desempeño de los MHL en la componente u, presentando niveles de correlación entre 0,6 y 0,7 y desviaciones estándar muy cercanas a la observada (Fig. 6).

Los resultados para el día 14 de septiembre muestran que, en su componente E-O, los mayores desempeños en RMS y correlación fueron registrados con el modelo FVCOM forzado con viento y deriva determinística (~717 m) y LEEWAY (0.69), respectivamente, por su parte, el modelo FVCOM forzado con marea mostró una diferencia mínima en desviación estándar (<1 m) respecto a la observada (Fig. 6). Para su componente N-S, los mayores desempeños en RMS y correlación fueron registrados con el modelo MULTIOBS con deriva determinística (~235 m) y HYCOM (0.93), finalmente, el modelo MULTIOBS mostró una diferencia mínima en desviación estándar (~59 m) respecto a la observada (Fig. 6). Durante este día, las comparaciones de las componentes de velocidad arrojaron valores muy bajos de desempeño (Fig. 6).

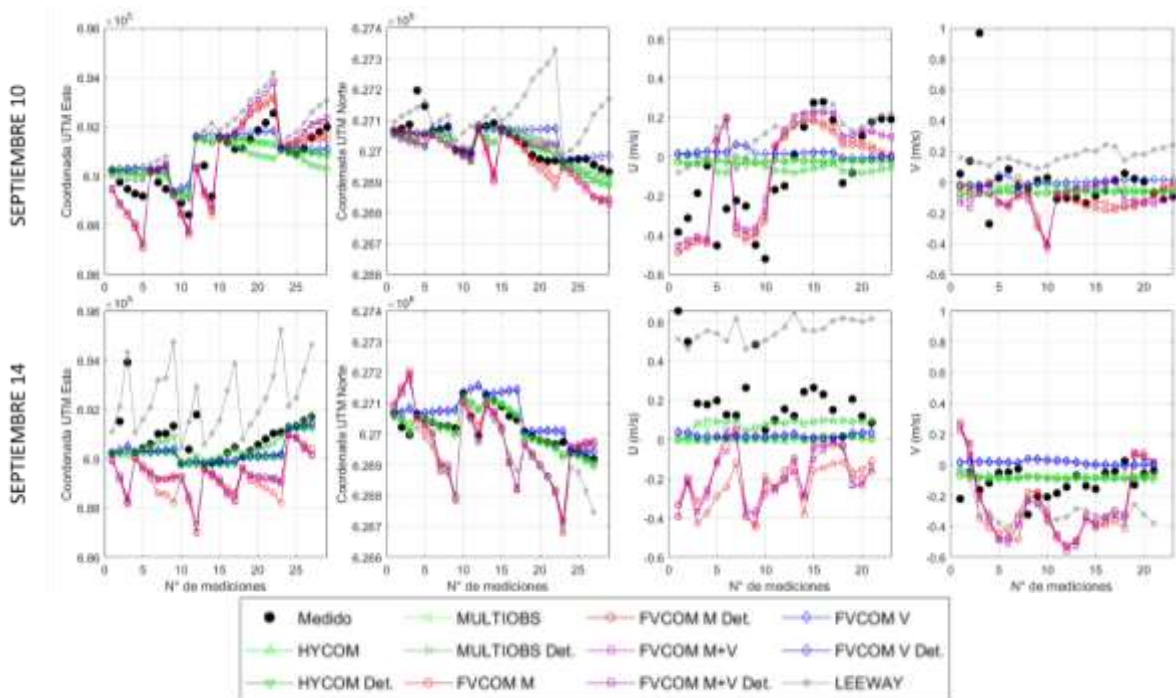


Figura 5. Comparación entre derivadores medidos y modelados. Las posiciones y velocidades fueron concatenadas de forma sucesiva como número de mediciones.

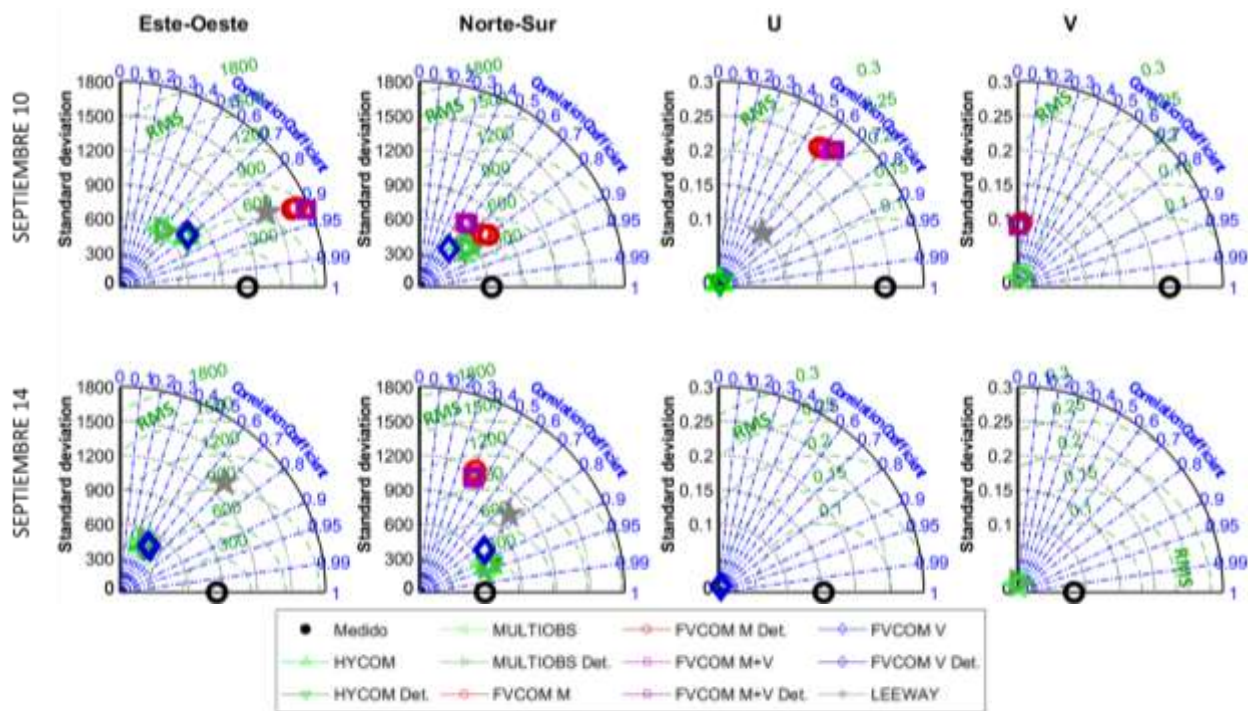


Figura 6. Desempeño de las derivas modeladas respecto a las medidas.

3.2. Validación de las trayectorias estimadas durante el accidente

Para este experimento, se evaluaron los arribos de las partículas liberadas respecto al registro de hallazgos detallados en la Tabla 1 y Figura 1b. Estos registros fueron transformados en polígonos asumiendo un radio de 200 m a la redonda de los hallazgos puntuales.

Los resultados obtenidos a partir de los MHG, muestra una tendencia hacia los polígonos ubicados al centro y Oeste de la isla Robinson Crusoe, mientras que, al aplicar el sistema determinístico, estos resultados variaron hacia los polígonos ubicados al Este de la isla (Fig. 7). El método LEEWAY mostró derivas hacia los polígonos del centro y Este de la isla (Fig. 7).

Los resultados obtenidos mediante el MHL no determinístico, muestra una baja relación entre el modelo forzado con marea y los hallazgos, mientras que los forzados con viento y marea-viento tuvieron una tendencia hacia los polígonos del lado Oeste y centro, respectivamente, siendo este último, el único en arribar al polígono más alejado a la costa (Fig. 8). La aplicación del método determinístico generó una mayor distribución de los arribos en todos los casos ejecutados con FVCOM (Fig. 8).

La Figura 9, muestra el análisis temporal de los arribos modelados, donde se puede observar un adelantamiento de todos los arribos respecto a las fechas informadas por la autoridad, independiente del método utilizado, incluso para el caso de LEEWAY se observan la mayoría de los arribos antes del primer hallazgo registrado. Cabe señalar que, los tiempos de arribo de los modelos FVCOM forzado con marea-viento y viento se adelantaron a los arribos de MULTIOBS, independiente del uso del método determinístico. Finalmente se aprecia una mayor distribución temporal en los arribos estimados mediante el método determinístico, lo que fue más evidente en los resultados obtenidos mediante el modelo HYCOM.

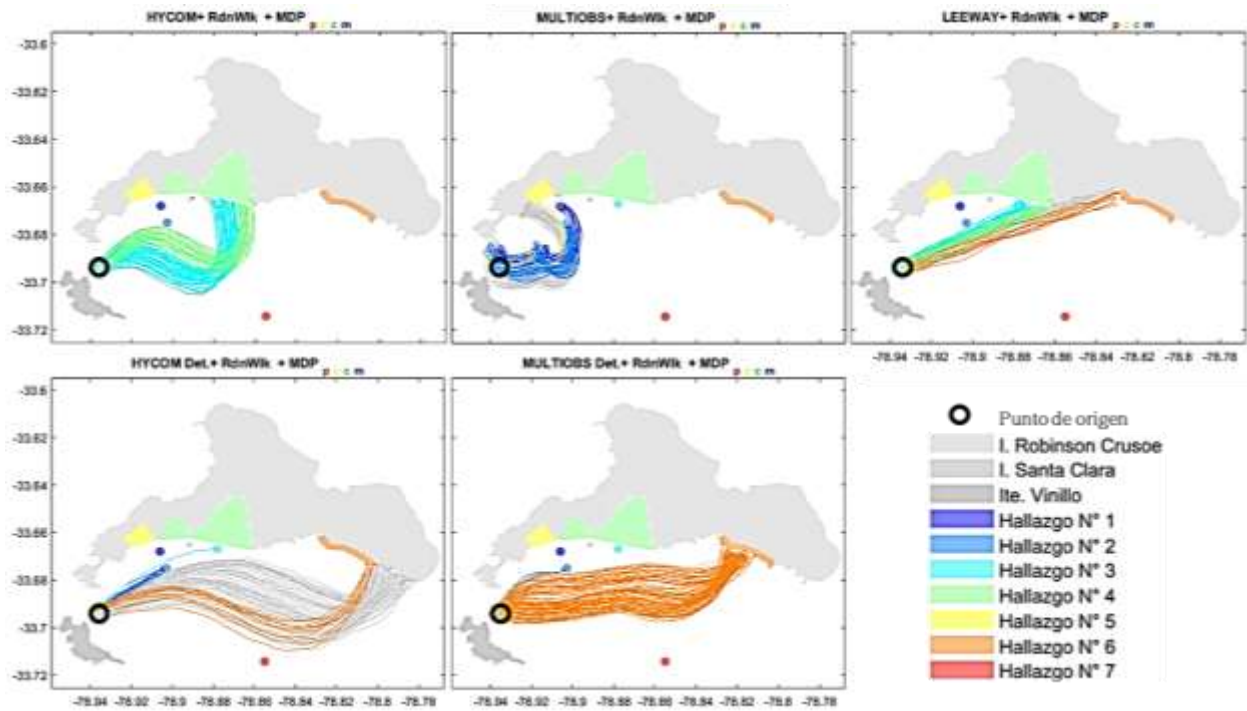


Figura 7. Trayectoria de partículas durante la emergencia SAR (MHG y LEEWAY).

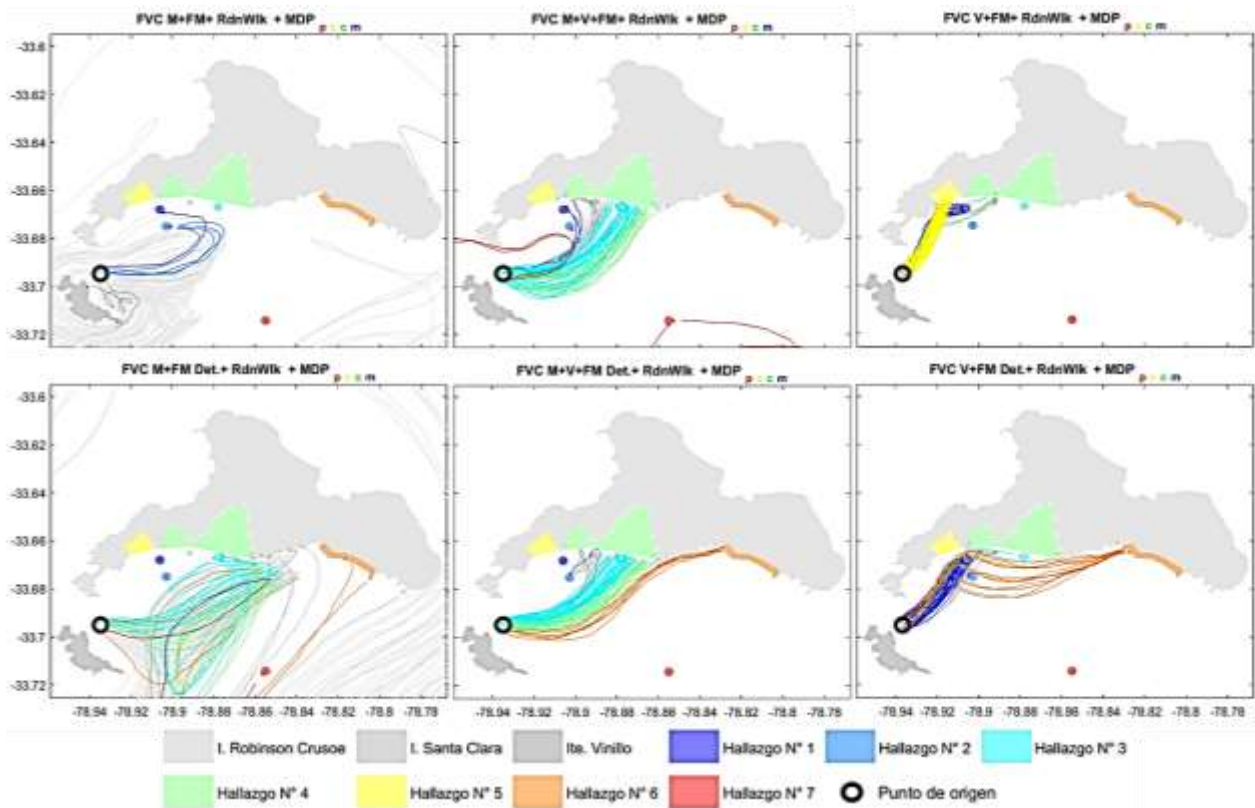


Figura 8. Trayectoria de partículas durante la emergencia SAR (MHL por escenarios).

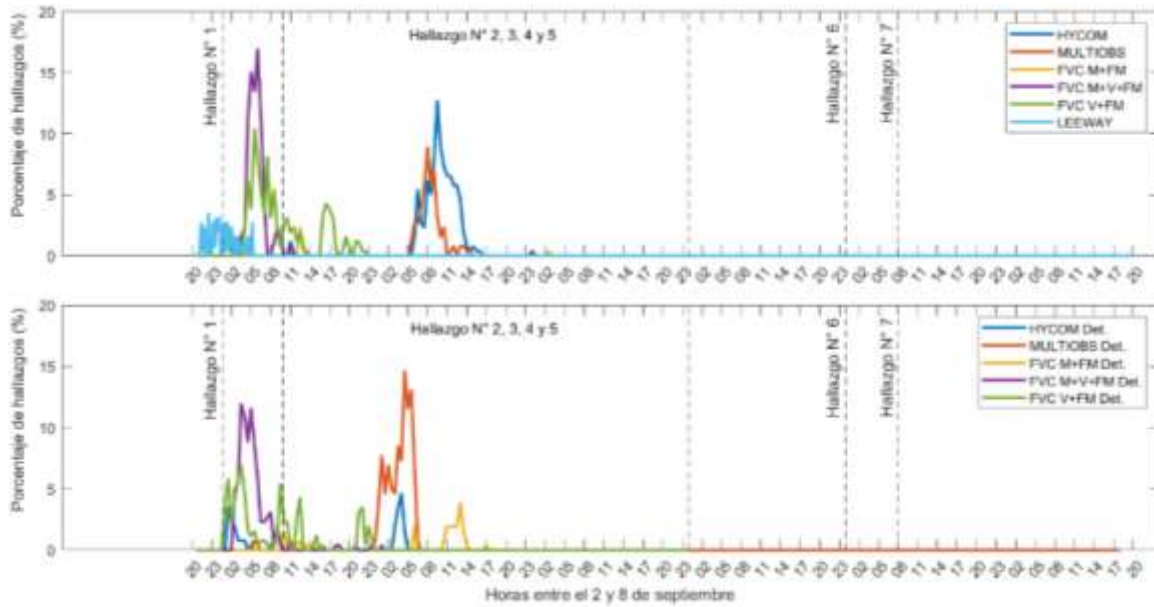


Figura 9. Análisis temporal de los arribos modelados durante la emergencia SAR.

4. DISCUSIÓN

Respecto a los resultados obtenidos para los días 10 y 14 de septiembre, no se observa claramente una dominancia de desempeño por cada método utilizado, sin embargo, se puede apreciar una buena asociación entre metodologías, identificando un grupo asociado a la influencia del viento (MHG y FVCOM forzado con viento), otro grupo asociado a la influencia de la marea (FVCOM forzado con marea y marea-viento) y LEEWAY. Esta asociación entre modelos presentó diferencias entre cada día, pudiendo observar una disminución del desempeño de los modelos asociados a la marea para el día 14, relacionado a la presencia de vientos en incremento con dirección persistente desde el Noroeste, concordando con la información histórica del área (Pub. SHOA 3001).

Del análisis durante el accidente, se deduce que, a excepción de las modelaciones con FVCOM forzado con marea, el MHL representó de mejor forma la distribución de los arribos respecto a los hallazgos y a pesar de que el método determinístico no significó una mejora de los arribos de los MHG, si lo fue para todos los escenarios del MHL.

Finalmente, las comparaciones realizadas, tanto con los registros de hallazgos como con los derivadores medidos, indican cierta dificultad en reproducir la velocidad de las derivas, lo cual puede estar relacionado a variados factores, desde los errores de las mediciones, como en las simplificaciones realizadas al momento de modelar los diferentes escenarios.

5. CONCLUSIÓN

Los MHG, a pesar de su baja resolución espacial y temporal, son una fuente válida de información ante eventuales emergencias SAR y es aún más valiosa considerando su alta cobertura espacial y su fácil y rápido acceso. Los MHL mejoraron la distribución espacial de las derivas y el uso de variados escenarios permitió que sus resultados abordaran diferentes condiciones oceanográficas

presentes en la zona del archipiélago de Juan Fernández. El uso del método determinístico significó una mejora sustancial en los resultados de los MHL, tanto en distribución temporal como espacial de las trayectorias. El método LEEWAY, a pesar de su diferencia metodológica, resultó también ser una fuente válida de información asociado a los datos del modelo ERA 5.

Lo antes expuesto, permite concluir que la redundancia de metodologías sería un aporte para la toma de decisiones durante una emergencia, pero también sugieren que, para una óptima elección del método, se requiere de un completo registro de hallazgos e idealmente, mediciones in situ mediante derivadores de transmisión satelital, lo que permitiría medir, en tiempo casi real, el desempeño de las metodologías y modelos utilizados. Las diferencias temporales registradas sugieren seguir trabajando bajo la línea de múltiples metodologías y realizar validaciones bajo condiciones de mayor control, tanto de las dimensiones de los elementos derivadores, como de las condiciones oceanográficas y atmosféricas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Armada de Chile, a la Fuerza Aérea de Chile y a la Dirección Meteorológica de Chile, por la facilitación de datos registrados en la época del accidente y en especial, al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, por la facilitación de datos batimétricos y oceanográficos. Finalmente quisiera agradecer a la Universidad Santa María por el soporte académico, y a mi familia por todo su apoyo y cariño.

REFERENCIAS

- Allen, A. A. 2005. Leeway Divergence Report, Tech. rep., US Coast Guard Research and Development Center, 2082 Shennecossett Road, Groton, CT, USA.
- Chen, C., Liu, H., & Beardsley, R. C. 2003. An Unstructured Grid, Finite-Volume, Three-Dimensional, Primitive Equations Ocean Model: Application to Coastal Ocean and Estuaries. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(1), 159–186.
- Chen C., H. Liu & R. Beardsley. 2013. 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 Dynamics* 62, 943–952.
- 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. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(8), 1979–1997.
- Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR). 2019. Boletín: Análisis estadístico de emergencias marítimas. Armada de Chile.
- Egbert, Gary D., & Svetlana Y. Erofeeva. 2002. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 19.2: 183-204.
- GEBCO Compilation Group (2021) GEBCO 2021 Grid.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., *et al.* 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999–2049.
- Pub. SHOA 3001. Derrotero de la costa de Chile. Volumen I.