

Simulación numérica de las corrientes marinas en la bahía del Callao

M. Merma *¹, C. Aguirre¹ y J. Quispe¹

¹ *Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú*

Recibido 13 Oct 2022 – Aceptado 14 Feb 2023 – Publicado 16 Feb 2023

¹ Resumen

En el presente estudio se realizó la simulación numérica de las corrientes marinas en la Bahía del Callao, teniendo en cuenta los forzantes meteorológicos, se adaptó y configuró el Modelo ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model), un modelo hidrodinámico 3D diseñado para la simulación numérica de la hidrodinámica y termodinámica, los resultados de la simulación muestran que el modelo puede determinar con una buena aproximación la variación espacial y temporal de la magnitud de las corrientes marinas, las cuales han sido contrastadas con mediciones de campo, obteniendo como resultado un error mínimo de 1,39 % y máxima del 42,25 %. El modelo simuló correctamente a nivel superficial las corrientes marinas en la Bahía del Callao para Mayo del 2016.

Palabras clave: bahía del Callao, corrientes marinas, simulación numérica.

Numerical simulation of marine currents in the Callao bay

Abstract

In the present study, the numerical simulation of marine currents in the Callao Bay was carried out, taking into account meteorological forcing forces, the ELCOM Model (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model) was adapted and configured, a 3D hydrodynamic model designed for the numerical simulation of the hydrodynamics and thermodynamics, the results of the simulation show that the model can determine with a good approximation the spatial and temporal variation of the magnitude of the marine currents, which have been contrasted with field measurements, obtaining as a result a minimum error of 1.39 % and maximum of 42.25 %. The model correctly simulated the surface level of the marine currents in the Callao Bay for the period of May 2016.

Keywords: Callao bay, marine currents, numerical simulation.

Introducción

La investigación en los ecosistemas costeros utilizando la modelación numérica con el uso de datos de campo constituyen una herramienta para el estudio de impactos que proceden de las actividades humanas. Los vientos juegan un papel muy importante en el sistema de corrientes costeras, en la generación de surgencia y hundimiento. La circulación oceánica a nivel de superficie es generada directamente por la fricción de viento, además de gravedad, gradiente de presión, rotación de la tierra, así como la forma de las líneas de costa [1].

forzada principalmente por la fricción con el viento. La mayoría de las corrientes superficiales se mueven encima de la picnolina, es la región donde la densidad del agua varía rápidamente con la profundidad [2].

La Corriente de Perú o Corriente de Humboldt es una corriente fría que fluye hacia el norte a lo largo de la costa occidental de América del Sur. Sus bajas temperaturas son causadas por los vientos alisios que, al soplar paralelos a la costa del Perú, desplazan las capas de agua calientes superficiales y provocan la surgencia de las aguas profundas mucho más frías [3].

Las corrientes superficiales fluyen horizontalmente

La Corriente Costera Peruana (CCP), con escasas di-

* mmermaj@unmsm.edu.pe

¹ © Los autores retienen los Derechos de Autor, bajo términos de la Licencia Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0. Se permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio con la respectiva citación.



ferencias de ubicación, se desplaza de sur a norte sobre los 50 m de profundidad en áreas cercanas a la costa, con velocidades de 20 a 28 cm/s [4].

También las corrientes tienen relación con el clima y en la costa peruana está influenciado por la corriente marina fría, por lo cual predomina un clima templado y húmedo [5].

Existen estudios sobre modelamiento numérico respecto de la hidrodinámica y las corrientes marinas, como es el caso de la bahía de Ferrol, Chimbote donde se utilizó el modelo numérico Princeton Ocean Model (POM) con el cual se realizó simulaciones numéricas del patrón de corrientes superficiales forzados por viento y marea en la bahía debido a que la bahía presenta características de aguas poco profundas. Los resultados mostraron la influencia del viento y la marea en la generación de corrientes, concluyendo que la marea tiene mayor influencia dentro de la bahía y el viento por fuera de esta [6].

En la Bahía de Paracas se realizó un estudio para reproducir el patrón hidrodinámico, para lo cual fue construido un modelo numérico utilizando ecuaciones bidimensionales para aguas superficiales, con la finalidad de obtener respuesta a la acción de ondas de marea y fuerza de arrastre del viento, concluyendo que el modelo produce buenos resultados para propagación de ondas de periodo corto [7].

En la bahía del Callao se realizó un estudio para las distribuciones de las corrientes con influencia de las descargar de los ríos Rímac y Chillón fue utilizado el modelo numérico ROMS (Regional Ocean Model System) el objetivo fue simular la circulación marina y descargas hipotéticas en la bahía del Callao, teniendo en cuenta las variaciones estacionales climatológicas y considerando la dirección e intensidad de los forzantes de viento [8].

Así mismo, para la bahía del Callao y Miraflores fue utilizado el modelo numérico POM para estudiar la circulación marina a nivel superficial con la finalidad de caracterizar el patrón de la circulación considerando el viento y la marea como forzantes [9].

Para medir corrientes superficiales se utilizan los ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) instrumentos hidroacústicos que registran la velocidad de las corrientes del agua en un rango determinado de profundidad.

El muestreo directo es la forma de obtener datos de los parámetros requeridos para un estudio específico, sin embargo, con el advenimiento de los sistemas de cómputo están siendo aprovechados a través de modelos numéricos que se ejecutan en una computadora y con la implementación de modelos para el océano se logran obtener también las magnitudes de velocidades de co-

rrientes, estas magnitudes generadas por el modelo nos dan una aproximación a los valores registrados por los instrumentos de medición, estos instrumentos tienen un costo que usualmente son asumidos por instituciones de investigación o empresas que aprovechan comercialmente el conocimiento de las corrientes marinas, como es la pesca a nivel industrial.

En este estudio se ha realizado una simulación numérica para determinar la magnitud de la corriente marina en la bahía del Callao usando el modelo numérico ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model) para el cual se ha considerado como forzante al viento y marea. Los resultados obtenidos fueron contrastados con datos medidos en la bahía del Callao por el Instituto del mar del Perú (IMARPE), los días 16, 17, 18 de mayo del 2016.

Monitoreo de velocidades de corriente en la bahía del Callao:

Como parte del monitoreo ambiental acuático en el área costera del Callao en 1999 se han registrado las magnitudes de las corrientes marinas obteniéndose valores entre 1.0 cm/s y 22.0 cm/s con promedio de 10 cm/s, y se observó convergencia de flujos costeros proveniente del Nor-Oeste y Sur-Oeste originando un remolino frente a las playas de Márquez en el Callao.

Continuando con el monitoreo de la calidad acuática en la bahía del Callao, en 2000 se realizaron nuevamente muestreo para las corrientes marinas y se reportaron que las magnitudes de velocidades de corrientes variaron entre 5.5 cm/s y 32.9 cm/s en la superficie, en tanto que en el fondo entre 1.0 cm/s y 22.0 cm/s. En marzo del 2002 como parte de la evaluación ambiental en las zonas costeras del Perú, se han registrado datos para las velocidades de las corrientes en la bahía del Callao, en la cual reportaron valores en la superficie entre 7 cm/s y 15 cm/s [10], [11], [12].

En el 2011 se realizó registro de las magnitudes de velocidades como parte de un estudio denominado línea base de la bahía del Callao, se efectuó en el área delimitada por las islas San Lorenzo y El Frontón y la Península de La Punta, del 21 al 30 de noviembre, con la finalidad de caracterizar aspectos biológicos y oceanográficos así mismo para obtener bases técnicas para el ordenamiento pesquero y acuícola [13].

Ecuaciones hidrodinámicas

El modelo ELCOM resuelve las ecuaciones de transporte de Reynolds o ecuaciones de Navier-Stokes promediadas para un estado no estacionario, además usa la aproximación de Boussinesq, las ecuaciones de momen-

tum, continuidad y transporte de escalares son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_\alpha}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_j} = & -g \left(\frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} + \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_z^\eta \rho' dz \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x_1} (\nu_1 \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_1}) + \frac{\partial}{\partial x_2} (\nu_2 \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_2}) + \\ & \frac{\partial}{\partial x_3} (\nu_3 \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_3}) - \varepsilon_{\alpha\beta} f U_\beta \end{aligned} \quad (1)$$

donde η es la altura de la superficie libre respecto de un nivel de referencia. ν es el coeficiente de viscosidad de torbellino. ρ' es la densidad del fluido, f es la fuerza de Coriolis, $\varepsilon_{\alpha\beta}$ es el tensor de permutación de dos componentes. Las ecuaciones de continuidad:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

donde U_j son las componentes de la velocidad. Las ecuaciones de condiciones de frontera de momentum en la superficie libre

$$\frac{\partial U_\alpha}{\partial x_3} = 0 \quad (3)$$

Las ecuaciones de condiciones de frontera de momentum, en el fondo y los lados

$$U_i = 0 \quad (4)$$

La ecuación de transporte de escalares

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (C U_j) = & \frac{\partial}{\partial x_1} (\kappa_1 \frac{\partial C}{\partial x_1}) + \\ & \frac{\partial}{\partial x_2} (\kappa_2 \frac{\partial C}{\partial x_2}) + \frac{\partial}{\partial x_3} (\kappa_3 \frac{\partial C}{\partial x_3}) + S_c \end{aligned} \quad (5)$$

donde κ_i con $i = 1, 2, 3$ representan los coeficientes de difusividad para la temperatura, salinidad u otra sustancia, S_c representan las fuentes o sumideros de los escalares transportados, C es la concentración del escalar transportado.

Datos medidos de corrientes

Las magnitudes de las velocidades para las corrientes registradas en la superficie se muestran en el Tabla 1, estas son identificadas con desde 11 hasta 20, estos datos fueron registrados en los días 16, 17, 18 de mayo del 2016, por el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) [14].

Estación	Longitud	Latitud	v(cm/s)
11	-77.19833	-12.06722	12.58
12	-77.18022	-12.05494	6.37
13	-77.16225	-12.05972	8.77
14	-77.15794	-12.03433	3.65
15	-77.18058	-12.03353	5.13
16	-77.20350	-12.03219	9.79
17	-77.21775	-12.03358	18.33
18	-77.23172	-12.00222	9.13
19	-77.20161	-12.00069	7.79
20	-77.17025	-12.00086	8.83

Tabla 1: Estaciones donde se han registrado magnitudes para las velocidades de corrientes.

La enumeración de las estaciones comienza desde 11 hasta 20, las estaciones desde 1 hasta 10 se encuentran fuera de la región de estudio, a veces para los registros en vez de números se asignan letras y no necesariamente números en secuencia.

En la Figura 1 se muestra la distribución de velocidades superficiales, además las posiciones de las estaciones donde se han realizado las mediciones de los datos mostrados en la la Tabla 1.

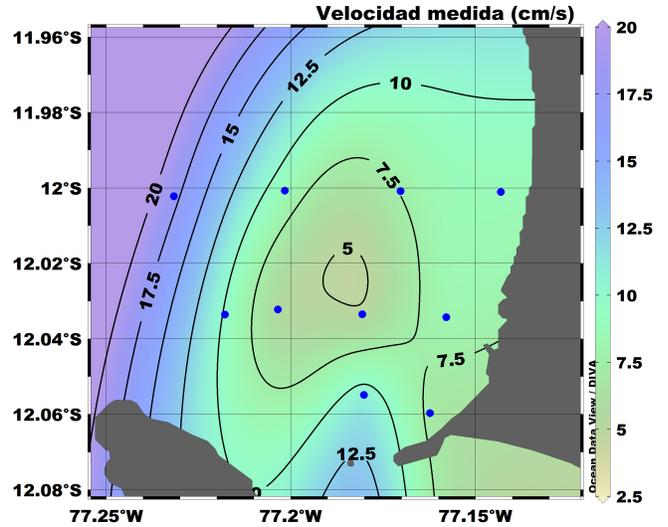


Figura 1: Distribución de velocidades superficiales medidas y posiciones de las estaciones de monitoreo mayo 2016 (Generado con Ocean Data View / ODV).

Metodología

Los datos registrados en el monitoreo para las estaciones 11 hasta 20 mostrados en la Figura 1 son la referencia para validar con los resultados de la simulación numérica.

Para la simulación se ha utilizado el modelo numérico ELCOM, (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model),

del Centre for Water Research, University of Western Australia, que aplica modelos hidrodinámicos y termodinámicos para simular el comportamiento temporal de cuerpos de agua estratificadas con forzantes medioambientales [15].

Se utilizaron datos meteorológicos que fueron obtenidos desde el servicio web Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Versión (MERRA-2), que ofrece series temporales de temperatura, humedad relativa, presión a 2 m de altura sobre el nivel del suelo, velocidad y dirección del viento a 10 m., <https://www.soda-pro.com/web-services/meteo-data/merra><https://www.soda-pro.com>

También se han utilizado datos de marea que fueron obtenidos desde el servicio **Sealevel Station Catalog (SSC)**, <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/>, que mantiene actualizado los datos registrados por la estación meteorológica del Callao. En este caso los datos tienen una frecuencia de registro de una hora.

Preparación de datos: Se preparó datos de batimetría para la Bahía del Callao, construyendo una matriz bidimensional con distribución de profundidades. Asimismo, los datos meteorológicos y de marea fueron preparados en formatos de columnas de texto para satisfacer las exigencias de entrada al modelo ELCOM, en este proceso se han definido las dimensiones para el paso de tiempo y paso de malla.

Condiciones de frontera: Se configuraron las fronteras abiertas para el modelo, en la Figura 4 se muestran cuatro fronteras abiertas uno en la parte superior, otro en la parte lateral izquierda, y dos en la parte inferior, asimismo las fronteras que corresponde a tierra firme y la línea de costa, todos son identificados en términos de celdas identificadas en filas y columnas en la malla de simulación.

Para condición de estabilidad, se ha considerado el paso de tiempo y el tamaño de paso de la malla de simulación. La condición CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) en el modelo ELCOM está dado por

$$\Delta t < \frac{CFL}{U} \Delta x \quad (6)$$

donde U es la componente longitudinal de la velocidad, Δx es el tamaño de paso de la malla de simulación, y Δt es el tamaño de paso de tiempo.

Datos de viento: En la Figura 2 se muestra la distribución temporal de las magnitudes para las velocidades del viento para el mes de mayo del 2016.

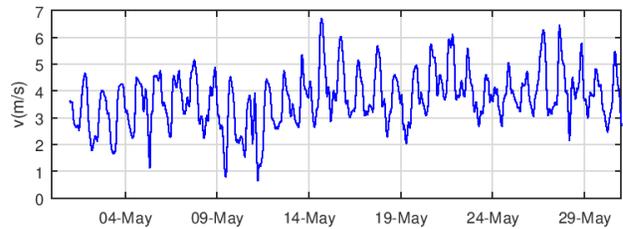


Figura 2: Serie de tiempo para el viento, periodo mayo 2016, bahía del Callao

En la Figura 3 se muestran intervalos de magnitud de la velocidad del viento dominantes entre 3 m/s a 4 m/s y representan el 40.1%, entre 4 m/s y 5 m/s representan el 27.7%, magnitudes entre 2 m/s y 3 m/s representan el 18.3%, se observa que magnitudes entre 0-1 m/s, 1-2 m/s, 5-6 m/s y 6-7 m/s representan cada uno menos del 8%.

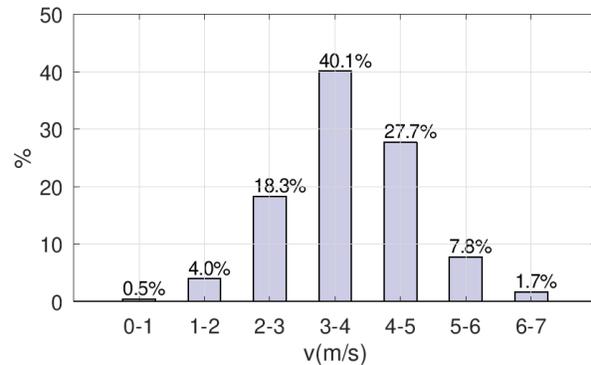


Figura 3: Magnitudes de velocidades para el viento en intervalos, mayo 2016, bahía del Callao.

En la Tabla 2 se muestran las direcciones preferentes del viento y se observa que es dominante en la dirección Sur con un 92.5% en tanto que para las direcciones Sur-Este y Sur-Oeste aparecen con el 1.1% y 6.4% respectivamente, no hay contribuciones en las otras direcciones.

SE	S	SO
1.1 %	92.5 %	6.4 %

Tabla 2: Direcciones preferenciales del viento, bahía del Callao, mayo 2016.

Paso temporal de simulación: Este parámetro está ligado al tamaño de la malla, así como a la magnitud de la velocidad horizontal, que debe satisfacerse la condición CFL (Courant-Friedrichs-Lewy), para este caso se ha elegido el paso de simulación igual $\Delta t = 120$ s y un tiempo total de simulación de 23 días. El paso de tiempo y paso de malla se relacionan para dar estabilidad a la simulación numérica.

Batimetría de Bahía del Callao en el modelo ELCOM La batimetría de la región de estudio se presenta en la Figura 4, se muestra la distribución de profundidades que van desde 0 a 100 metros. Esta batimetría está en términos de celdas de la malla de simulación, tal como utiliza el modelo para ejecutar el proceso numérico.

Los datos de batimetría se han obtenido desde ETOPO una base de datos internacional, a partir del cual se ha adaptado a través de interpolación la malla de simulación para el modelo con paso espacial de 100 m.

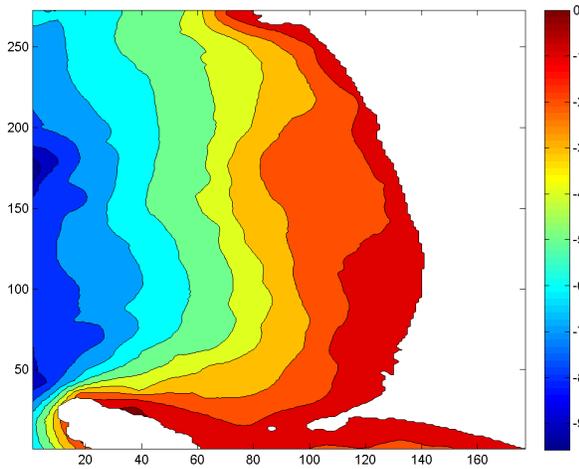


Figura 4: Batimetría Bahía del Callao, en el modelo ELCOM, en términos de número de celdas de la malla de simulación donde cada celda es de 100 m, en la horizontal y vertical, la barra indica la distribución de profundidades expresada en metros.

Control de fronteras abiertas

Las condiciones de fronteras abiertas en el modelo ELCOM están controlados por la ecuación 4 que establece que el momentum en las fronteras abiertas se inicializa en un estado estacionario, lo mismo que en el fondo. Para el presente caso en la Figura 4 se pueden apreciar cuatro fronteras abiertas uno en la parte superior (Norte), otro al lado izquierdo (Oeste) y dos en la parte inferior (Sur). En todas estas fronteras al comienzo de la simulación las velocidades de las corrientes comienzan en cero.

Para el modelo numérico la forma de identificar las celdas en la malla para las fronteras abiertas es a través de una codificación establecida, así una celda en la malla bidimensional indica la profundidad a través de un número, indicando su valor respecto de la superficie, y para una frontera que es tierra firme se impone el código 999 en tanto que para fronteras abiertas que no son tierra con entrada de flujo de agua se impone el código 888.

Por otra parte usualmente en otros modelos numéricos de escala regional utilizan métodos de anidamiento a partir de los cuales ajustan la interacción del momentum global como entrada para el dominio de simulación anidada. En el caso de este estudio no es utilizado.

Estadísticas para evaluación de valores medidos y simulados:

Las magnitudes de velocidades simuladas en cada una de las estaciones fueron sometidos a un proceso de filtro con la finalidad de eliminar las fluctuaciones a través de la media móvil, el criterio para la selección de la media móvil adecuada se realizó a través del error cuadrático medio (RMSE), la comparación de las magnitudes de las velocidades medidas y simuladas se realizó a través del error porcentual que cuantifica la precisión de los valores simulados respecto de los medidos. La expresión para el error porcentual $E\%$ y la raíz cuadrada del error medio (RMSE), están dadas por

$$E\% = \frac{|x_m - x_s|}{x_m} \times 100\% \quad (7)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Donde x_s , x_i son los valores obtenidos por la simulación numérica, x_m , y_i los valores obtenidos medición directa, N es el número de observaciones.

Discusión de resultados

Sobre la dirección del viento en la bahía del Callao para el mes de mayo del 2016 como se muestra en la Tabla 2 es predominante desde el Sur, con contribuciones menores desde el Sur-este como del Sur-oeste.

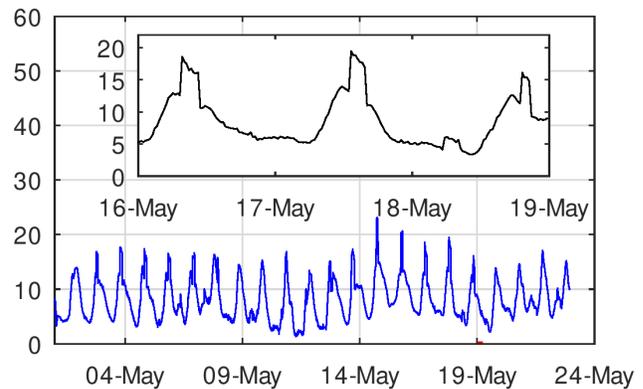


Figura 5: Evolución temporal de las velocidades en la estación 12 en todo el tiempo de simulación y una ampliación para los días 16,17,18 de mayo 2016.

En la Figura 5 se muestra la evolución temporal de la velocidad en la estación 12 a partir del cual se ha extraído la magnitud de la velocidad simulada para se validada, de la misma forma para cada una de las demás estaciones.

En la Tabla 3 se muestra la comparación entre las magnitudes de las velocidades simuladas y las registradas por medición directa en la bahía del Callao, se aprecia que en las estaciones 11, 16, 17, 18 tienen error entre 1.39 % y 21.49 %, y las estaciones 12, 13, 14, 15, 20 con error entre 27.91 % y 42.25 %, entre todas el menor error corresponde a la estación 19 y el mayor error a las estación 12.

Estación	Medido v_m (cm/s)	Simulado v_s (cm/s)	Error (%)
11	12.58	11.36	9.74
12	6.37	9.06	42.25
13	8.77	5.29	39.68
14	3.65	4.72	29.30
15	5.13	7.15	39.41
16	9.79	9.15	6.50
17	18.33	16.15	11.89
18	9.13	7.17	21.49
19	7.79	7.68	1.39
20	8.83	11.29	27.91

Tabla 3: Error en las comparación magnitudes medidas y simuladas, estaciones 11 hasta 20.

En la Figura 6 se muestra la correlación entre los valores medidos y simulados para las magnitudes de las velocidades, esto muestra la validación de la simulación numérica.

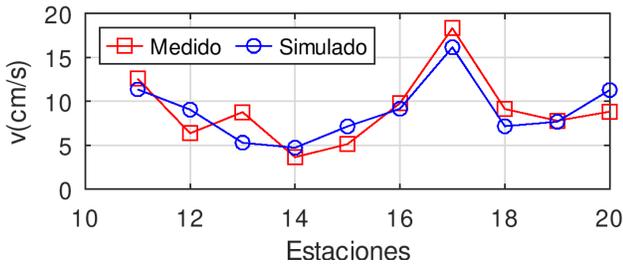


Figura 6: Correlación de las magnitudes de velocidades medidas y simuladas.

Circulación en la bahía del Callao. En la Figura 7 se muestra la circulación de las corrientes marinas superficiales simuladas, se observa que el patrón de magnitudes para las velocidades de las corrientes en la parte central está alrededor de 5 cm/s muy similar para la parte central en los datos medidos como se muestra en la Figura 1. De la misma forma en la frontera abierta del oeste las magnitudes medidas y

simuladas presentan un patrón similar de magnitudes, igual que en la frontera abierta del sur y del norte.

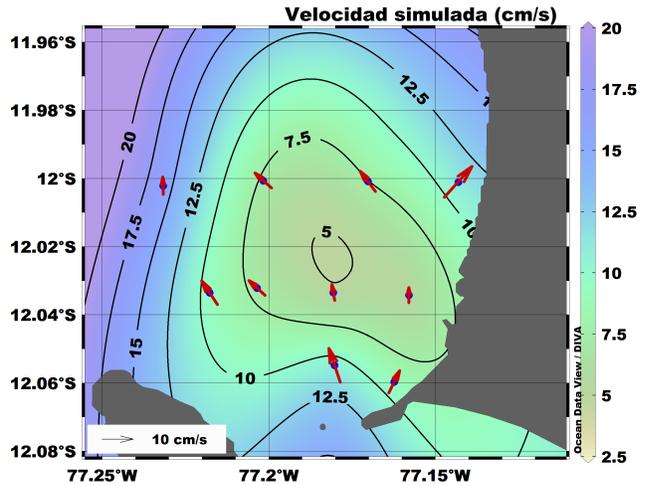


Figura 7: Circulación de las corrientes marinas simuladas en la bahía del Callao.

En la Figura 8 se muestran la serie de tiempo para los valores de la condición CFL para las coordenadas x, y, z, se observa que tanto para x e y los valores son los mismos comenzando en un poco más de 0.4 y luego estabilizándose alrededor de 0.5 durante todo el tiempo de simulación.

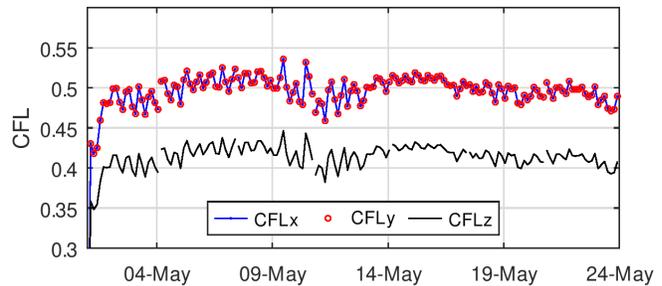


Figura 8: Condición CFL para la simulación.

En la simulación los valores de CFL no deben superar la unidad.

En la Figura 9 se muestra el campo de velocidades para el 18 de mayo del 2016 a las catorce horas a nivel de superficie donde se aprecia que las corrientes ingresan a la bahía desde el oeste con magnitudes de velocidad entre 15 cm/s y 30 cm/s, se acercan hacia la costa por la parte norte con velocidades entre 10 cm/s y 15 cm/s en tanto que por la parte sur se acercan con velocidades entre 5 cm/s y 10 cm/s.

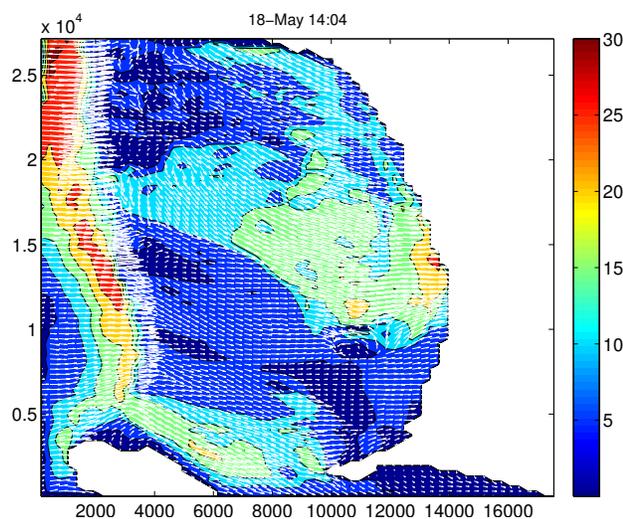


Figura 9: Campo de velocidades en la superficie, la barra de colores indica la magnitud de la corriente expresado en cm/s , la distancia horizontal y vertical esta expresado en metro.

Conclusiones

El viento como forzante para el modelo, así como importante causa para las corrientes marinas, en la bahía del Callao como se aprecia en la Tabla 2 es predominante en la dirección Sur, aunque también tiene contribuciones menores del 7% en las direcciones Sur-Oeste y Sur-Este.

Las magnitudes de las velocidades registradas directamente a través de instrumentos de medición, se pue-

den estimar a través de modelos numéricos, los cuales se aproximan a los valores registrados con un nivel de precisión cuantificados a través del error porcentual, como se aprecia en la Tabla 3.

El modelo simuló acertadamente en la mayoría de las estaciones, como se aprecia en la Figura 6. Los valores mínimos y máximos de la discrepancia están dentro de los resultados enmarcados para simulaciones numéricas ya que estos proporcionan resultados aproximados, de acuerdo con la literatura y trabajos realizados sobre este tema.

Respecto de la simulación numérica es importante seleccionar los valores el paso de malla y paso de tiempo ya que estos están relacionados con la condición CFL, el cual indica estabilidad a los resultados.

Para mejorar la comparación de los resultados medidos y simulados es necesario contar con datos para un periodo de tiempo mayor de manera que se tendría una serie de datos por cada estación en vez de un solo dato por cada estación como se muestra en la Tabla 1, a partir de los cuales el proceso de comparación llevaría a mejorar los resultados.

Agradecimientos

A los autores del modelo ELCOM, (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model), del Centre for Water Research, University of Western Australia, utilizado en esta investigación.

A Gerardo Ramírez por la implementación de códigos de computadora para la realización de batimetría para el modelo ELCOM.

Referencias

- [1] Departamento de Oceanografía Universidad de Concepción, Biología marina y oceanografía: conceptos y procesos, Tomo I, Concepción, (2005).
- [2] T. Garrison, *Fundamentos de Oceanografía*. CEN-CAGE Learning, Canada (2016).
- [3] R. F. Lanza, *Meteorología y oceanografía*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, Salamanca (2006).
- [4] N. Domínguez, J. Quispe, L. Vásquez, Principales corrientes marinas frente a la costa peruana durante el 2008-2009, Boletín Instituto del Mar del Perú, Vol. 26, Números 1 y 2, (2011).
- [5] G. Sánchez, N. Blas y G. Chau, Informe nacional sobre el estado del ambiente marino del Perú, consultoría Convenio IMARPE-CPPS, Callao, Lima, (2010).
- [6] E. Guzmán, Modelamiento de corrientes superficiales inducidas por viento y marea en la bahía Ferrol-Chimbote, Lima: UNMSM, (2006).
- [7] V. Yzocupe, Modelo numérico de flujo bidimensional de la bahía de Paracas, Revista de Investigación de Física, vol. 5, pp. 1-9, (2002).
- [8] D. Correa, J. Tam, J. Pasapera, M. Saavedra y A. Ingunza, Modelado de la circulación marina y descargas hipotéticas en la bahía del Callao, Perú, Lima: IMARPE, (2008).
- [9] M. Centeno, E. Guzmán y P. García, Modelación numérica de la circulación marina en las bahías Callao y Miraflores, Revista del Encuentro Científico Internacional, vol. 7, N^o 1, pp. 59-66, (2010).

- [10] R. Cabello, C. Fierro y L. Vásquez, Evaluación de la calidad acuática en el área costera del Callao agosto 1999, informe progresivo No 125, Lima: Instituto del Mar del Perú (IMARPE), (1999).
- [11] M. Guzmán, M. Jacinto, S. Castillo, L. Vásquez y E. Delgado, Evaluación de la calidad acuática en el área costera del Callao 2000, Lima: IMARPE, (2000).
- [12] G. Sanchez, R. Orozco y M. Guzmán, Bahía del Callao, Perú. Evaluación ambiental en marzo 2002, Informe IMARPE Vol 35 (1), Lima, (2008).
- [13] J. Arguelles y J. Quispe et al, Estudio línea base-ELBA Callao primavera 2011, Lima: Instituto del Mar del Perú (IMARPE), (2011).
- [14] J. Quispe, Monitoreo de la Calidad acuática en la bahía del Callao, periodo 16-18 mayo 2016, Lima: IMARPE, (2016).
- [15] B. Hodges and C. Dallimore, Estuary Lake and Coastal Ocean Model (ELCOM) v2.2 User Manual, Centre for Water Research, University of Western Australia, (2007).
- [16] R. Schlitzer, Ocean Data View, <http://odv.awi.de>, (2021).
- [17] J. W. Eaton, D. Bateman, S. Hauberg y R. Wehbring, GNU Octave version 6.1.0 manual: a high-level interactive language for numerical computations <https://www.gnu.org/software/octave/doc/v6.3.0>, (2020).