

Simulación numérica para representación de corrientes inducidas por oleaje. Aplicación al puerto de Ilo-Perú

 César Alpaca^{*1,2}, Emanuel Guzmán¹, César Quispe¹, Juan Muñoz² y Bismarck Jigena²

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

² Universidad de Cádiz, CASEM, España

Recibido 30 Ene 2024 – Aceptado 31 Mar 2024 – Publicado 26 Abr 2024

Resumen

Este artículo tiene como objetivo representar las corrientes inducidas por oleaje en las zonas cercanas al puerto de Ilo, con el uso del software SMC (Sistema de Modelamiento Costero) y un programa de desarrollo propio en Matlab. En el presente estudio se utilizó para el módulo de oleaje la aproximación parabólica de RefDif, para un modelo de oleaje monocromático. El modelo numérico desarrollado en Matlab permite representar la hidrodinámica de olas y corrientes inducidas basado en las ecuaciones de Navier Stokes y conservación de masa, en forma diferencial con dos dimensiones espaciales (x, y) y una temporal (t). Este modelo se desarrolló tomando en consideración las variables promediadas en el eje vertical z y calado variable, considerando el fenómeno de shoaling y refracción que sufren las olas al acercarse a la zona costera de aguas poco profundas. El modelo desarrollado en Matlab se validó para caso simplificado de playas rectas. Al colocar un oleaje en direcciones Sur 30° Este, Este y Norte 30° Este, se observó que las corrientes inducidas por oleaje mantenían esas respectivas direcciones. Una vez validado el modelo desarrollado para caso simplificado, se corrió el programa para la batimetría de la zona cercana al puerto de Ilo. Validándose los resultados con data de campo obtenida con ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) con los del modelo y los resultados del software SMC inclusive. Se encontró una velocidad promedio del ADCP de 45.6 mm/s y una velocidad promedio del modelo SMC de 65.2 mm/s, mostrando una similitud del 70 % entre ambos valores. Los resultados de la simulación numérica muestran una desviación estándar en velocidades del 2 % para el punto de referencia del ADCP. Mientras que la desviación estándar de los datos del ADCP son de 24 %, para las velocidades resultantes.

Palabras clave: Simulación numérica de corrientes, olas, shoaling, refracción de olas.

* cesar.alpaca@unmsm.edu.pe

© Los autores. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



Numerical simulation for representation of wave-induced currents. Application to the port of Ilo-Peru

Abstract

The objective of this article is to represent the wave-induced currents in the areas near the port of Ilo, with the use of SMC software and a self-developed program in Matlab. In the present study, the parabolic RefDif approximation, for a monochromatic wave model was used for the wave module. The numerical model developed in Matlab allows representing the hydrodynamics of waves and induced currents based on the Navier Stokes equations and mass conservation, in differential form with two spatial dimensions (x, y) and one temporal (t) . This model was developed taking into consideration the variables averaged in the vertical z axis and variable draft, considering the phenomenon of protrusion and refraction that the waves suffer when approaching the coastal zone of shallow waters. The model developed in Matlab was validated for the simplified case of straight beaches. By placing a wave in directions South 30° East, East and North 30° East, it was observed that the wave-induced currents maintained those respective directions. Once the model developed for the simplified case was validated, the program for the bathymetry of the area near the port of Ilo was run. Validating the results with field data obtained with ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) with those of the model and the results of the SMC software included. Finding an average speed of the ADCP of 45.6 mm/s and an average speed of the SMC model of 65.2 mm/s, showing a similarity of 70 % between both values. The modeling results show a standard deviation in velocities of 2 % for the ADCP reference point. While the standard deviation of the ADCP data is 24 %, for the resulting velocities.

Keywords: Modeling of currents, waves, shoaling, wave refraction.

Introducción

El puerto de Ilo está ubicado al sur del Perú en la costa del Océano Pacífico e inició actividades en 1970. Su plataforma tiene una altura de nivel medio de 5 m en pleamar; permitiéndole atender naves de hasta 35,000 DWT (Deadweight tonnage) en labores de embarque y desembarque de carga a granel, contenedores y minerales, hasta 1'400,000 TM por año [3] APN (2018). Hoy en día, las facilidades logísticas del puerto de Ilo no son suficientes comparados con otros puertos cercanos como Arica, Iquique o Antofagasta [4] Solís et al (2011).

Para que el puerto de Ilo pueda presentarse como una alternativa viable y real como puerto de entrada/salida para la carga comercial boliviana en el océano Pacífico, debe mejorar sus condiciones. En este aspecto, lo más importante es mejorar sus condiciones de navegabilidad de la dársena y de acceso al puerto, ya que actualmente tiene poca profundidad y está limitado a un calado de 11.00 m, lo que dificulta las condiciones de operatividad para buques de mayor calado y, por lo tanto, de mayor capacidad.

Por otro lado, también se debe mejorar la operatividad de los servicios de carga, descarga y estiba de la carga y la eficiencia de los servicios administrativos y de gestión del puerto. En cuanto al acceso al puerto deben mejorar sus vías de acceso, tanto por carretera como el acceso ferroviario. En su trabajo sobre el puerto de la Bahía de Cádiz, sur de España [5] (Jigena Antelo et al., 2023a) realiza un estudio de las condiciones de navegabilidad del puerto de Cádiz y de la operativa en su nueva

terminal de contenedores, que dadas sus dimensiones se podría extrapolar al puerto de Ilo en Perú.

En este contexto, el estudio de corrientes en el puerto es importante porque ayuda a entender el impacto de la dinámica del oleaje en sus cercanías. Para ello, se realiza el estudio de corrientes en dos dimensiones espaciales (x, y) y una temporal (t) , realizado con el modelo numérico SMC Mopla (Sistema de Modelamiento Costero, Morfología de playas, 2000) [6].

Tal como muestran diversas investigaciones, los estudios de corriente son importantes para los desarrollos portuarios. [7] Mahmoodi et al. (2020) en el puerto de Noshahr en Irán, costa sur del mar Caspio, identificó las principales razones de la sedimentación severa en la entrada de dicho puerto. Para ello, evaluó mediciones topobatemétricas e hidrodinámicas del área de estudio con el software DHI MIKE para determinar las corrientes inducidas por viento.

[8] Leys & Mulligan (2015) indican que en el puerto de Saint John de la bahía de Fundy ubicado en el Atlántico Canadiense, se generan enormes mareas a la salida de un río muy grande, produciéndose una sedimentación significativa de limo y arcilla, complicando la navegación y el dragado. Otro lugar, en la costa arenosa de la isla de Príncipe Eduardo en Darnley Inlet, se tiene un área expuesta a mareas y tormentas, sedimentando el área y afectando el canal de navegación. Con la recopilación de información de batimetría, nivel de agua, viento, olas y sedimentos, observación de accidentes geográficos erosivos/depositacionales, y fotografías satelitales, efectuaron

una simulación numérica hidrodinámica utilizando el modelo MIKE21, lo que también permite conocer los campos de corriente.

Todos estos estudios destacan una fuerte interacción de olas y corrientes. Tanto la zona de oleaje como los procesos de marea son clave para explicar correctamente la hidrodinámica [12] (Jigena-Antelo et al., 2015). Se observa que las corrientes y mareas afectan la ruptura de olas y la turbulencia del mar [13] Arduin et al. (2012).

[14] Olabarrieta et al. (2011) y [13] Arduin et al. (2012) muestran que la generación local de olas se ve afectada por las corrientes. A altas frecuencias, el desplazamiento Doppler inducido por la corriente puede ser significativo, y la advección de las ondas puede detenerse cuando se enfrentan fuertes corrientes adversas. Las corrientes también actúan directamente sobre el propio esfuerzo del viento generando el crecimiento de la ola. Sin embargo, no queda claro el rol de las corrientes en este proceso. [15] Renault et al. (2016) utilizan un modelo acoplado aire-mar para resaltar un complejo efecto retroactivo de las corrientes oceánicas sobre el viento en la capa límite de aire superficial.

[16] Guzmán (2006) realizó una simulación numérica del patrón de corrientes superficiales forzados por viento y marea en la bahía Ferrol-Chimbote, con el objetivo de determinar la influencia de dichas forzantes, dando así un diagnóstico del patrón de corrientes que serviría como contribución a la evaluación de recambio de aguas y su influencia en el proceso de contaminación en la bahía. Empleó el modelo POM (Princeton Ocean Model) para simular la corriente de marea, empleó como forzante los principales constituyentes armónicos de marea obtenidos del modelo global TOPEX6.0, los cuales fueron comparados con las predicciones de marea publicadas en Internet por la DHN (Dirección de Hidrografía y Navegación). Los resultados obtenidos muestran la influencia del viento y la marea en la generación de corrientes, concluyendo que, debido a la configuración morfológica de la bahía, la circulación que se presenta es muy lenta y que la marea ejerce mayor influencia en la circulación dentro de la bahía Ferrol, mientras que la influencia del viento es notoria fuera de la bahía.

[17] Varona & Aleman (1999) estudiaron la caracterización de las corrientes marinas por zonas en el tramo costero de Cazonal-Cazonalito (Cuba). Los datos fueron tomados de cuatro etapas oceanográficas. Se realizó la simulación del comportamiento de las corrientes de marea y, por último, fueron calculadas las corrientes inducidas por el viento. Concluyeron que predominan las corrientes residuales, con rumbos E y NE, y que son importantes las corrientes de marea, algo inestables en dirección. Sin embargo, deben analizarse cuidadosamente los resultados de los modelos numéricos e incluso contrastarse con experimentos in situ [18] Muñoz-Pérez et al. (1999), pues su uso por personal no experto puede conducir a errores

drásticos [19] Gomez-Pina et al. (2007). Pequeñas variaciones en los parámetros de entrada pueden inducir resultados contradictorios en ciertas configuraciones batimétricas [20] Muñoz-Perez et al. (2010).

Metodología

Este artículo de investigación trata sobre las corrientes inducidas por oleaje en el puerto de Ilo. El modelo emplea las ecuaciones fundamentales de movimiento y continuidad en forma diferencial. Para la solución de estas ecuaciones se desarrolló un modelo en Matlab de diferencias finitas que permite determinar el campo de corrientes inducidas por el oleaje de la zona.

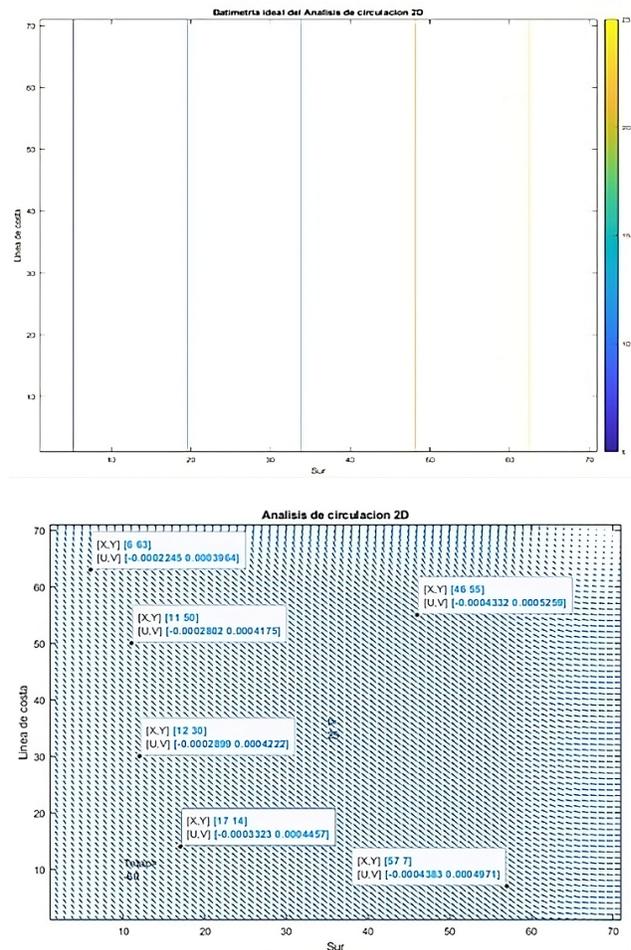


Figura 1: a) Batimetría recta de validación simplificada. b) Corrientes con ángulo de aproximación de -60° respecto al eje x de validación simplificada.

Los resultados de este modelo son validados primero para un caso simplificado de playas rectas. Encontrándose que las corrientes mantienen la dirección de apro-

ximación del oleaje (Figuras 1a y 1b). Luego de eso, se ejecutó el modelo para las zonas cercanas al Puerto de Ilo, comparándose los resultados con los datos tomados en campo desde el ADCP con los del Modelo SMC y del modelo de desarrollo propio.

El modelo numérico desarrollado representa la hidrodinámica de olas y corrientes inducidas. Para ello emplea las ecuaciones fundamentales de movimiento, y de oleaje del tipo parabólico deducido en RefDif, que es un modelo bidimensional (x, y) a calado variable z , teniendo en cuenta el fenómeno de shoaling y refracción que sufren las olas al acercarse a la zona costera, desde un tiempo $t = 0$ hasta un tiempo final t , aplicado al puerto de Ilo. El punto de partida para el desarrollo de los diferentes módulos que conforman la simulación está dado por la recopilación de datos en la zona de interés, así como de fuentes globales. Esta información se detalla a continuación:

- Olas en aguas oceánicas proveniente de la NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) (Figura 2), las mismas que serán propagadas hacia aguas costeras cercanas al puerto de Ilo (Figuras 3 y 4). Esta información de oleaje de aguas profundas corresponde al nodo de Latitud 17.5 S y longitud 72.0 O, (Figura 5). Determinándose con la distribución estadística Log-Normal de 3 parámetros la altura significativa de diseño (Figura 6).
- Información batimétrica de detalle realizada por [21] ENAPU (2021) en el área de interés (Figura 4).
- Variables de calibración del modelo tales como: velocidad perturbada de aguas profundas, ángulo de aproximación de aguas profundas, coeficiente de rugosidad de Manning, y otros descritos en el apartado datos de calibración del presente trabajo de investigación.

A diferencia del presente modelo en Matlab, el modelo [6] SMC Mopla (2000) desarrollado por la Universidad de Cantabria presenta resultados en forma cualitativa y grafica. Este modelo ha sido ampliamente comprobado y es muy utilizado en estudios oceanográficos. Para realizar la simulación numérica con el software SMC, se necesitó adicionalmente tener la batimetría general de aguas profundas, desde la Carta Batimétrica General de los Océanos, GEBCO. (Figura 2).

Previamente y con ayuda de un programa Gis se procesa la información de la batimetría general que está en formato NetCDF desde el Gebco. Los resultados se obtienen en formato XYZ que se pueden visualizar con un software de curvas de nivel (Figura 3). Estos resultados son necesarios para el modelo SMC.

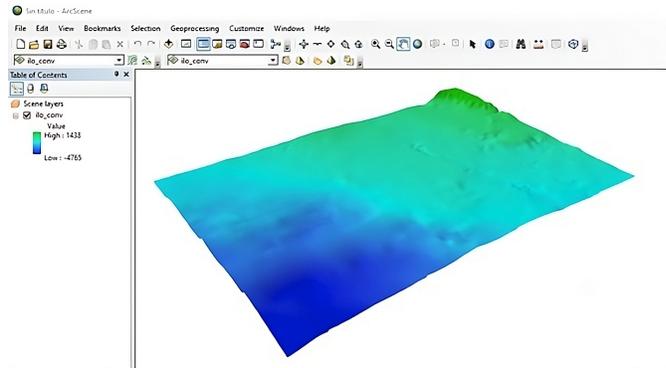


Figura 2: Batimetría general del puerto de Ilo desde Gebco.net

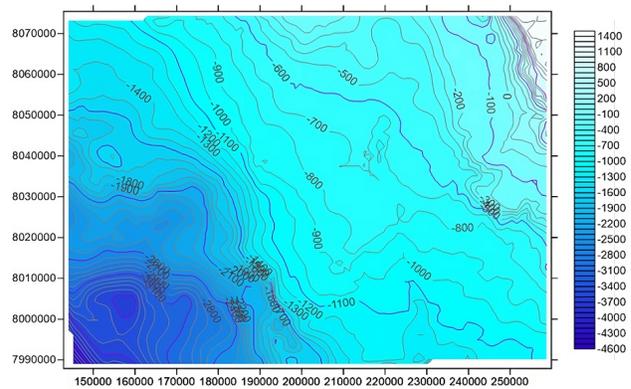


Figura 3: Curvas Topo-Batimétricas del puerto de Ilo en Surfer

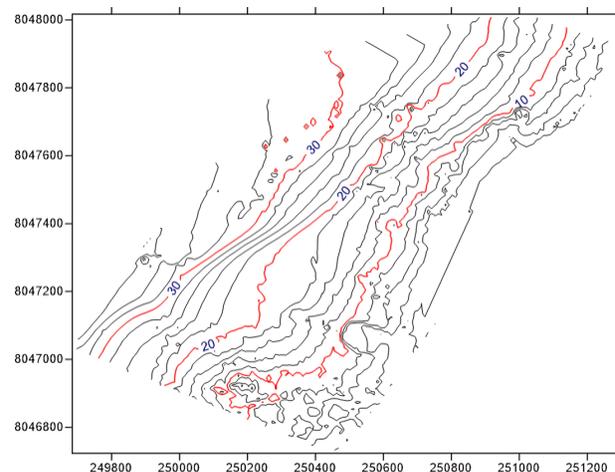


Figura 4: Batimetría de detalle para el puerto de Ilo en Surfer 8

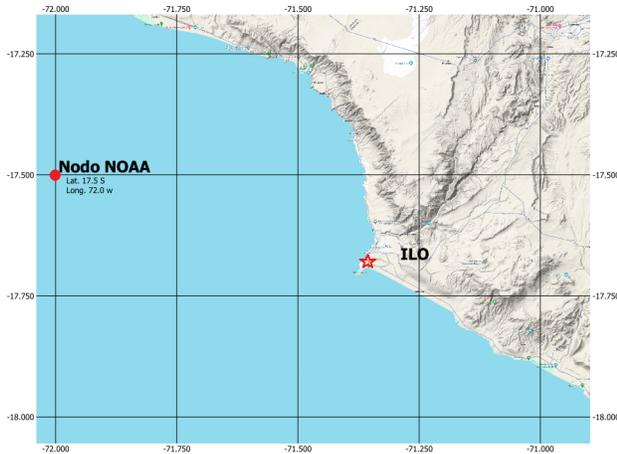


Figura 5: Localización del nodo del modelo WW3 de la NOAA para datos de oleaje. *Extraído de [21] ENAPU PERÚ (2021).*

La variable de oleaje altura de ola H_s , proyectados desde data de la NOAA con la distribución log-Normal de 3 parámetros. Siendo el coeficiente de regresión obtenido de $R^2=99.51\%$ para la altura de oleaje. El grafico representa la altura de ola significativa H_s con su respectiva probabilidad de excedencia. Para la presente simulación numérica se utilizó los datos de oleaje de 63 años. (Figura 6).

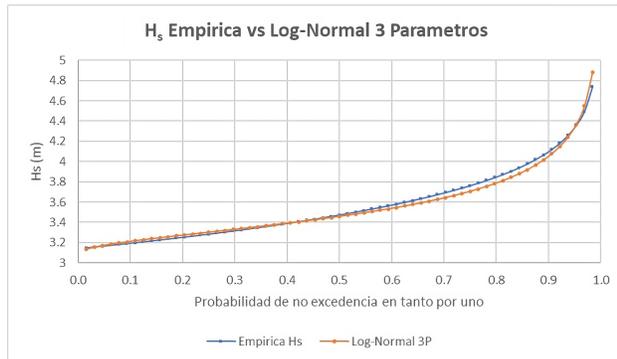


Figura 6: Proyección de la altura de Ola y período con tiempo de retorno en años.

TR	H_s
5	3.78844
10	4.05276
20	4.33978
50	4.76086
100	5.11470
200	5.50182
1000	6.54270

Tabla 1: Altura significativa (H_s) versus tiempo de retorno (TR)

La Tabla 1 muestra la altura significativa H_s probable con su respectivo período de retorno, dada la distribución de probabilidad Log-Normal de 3 parámetros.

Ecuaciones básicas de movimiento

Se utilizan las ecuaciones de Navier Stokes en coordenadas cartesianas con los ejes (x, y) dirigidos hacia el este y norte respectivamente y el eje z dirigido hacia arriba, siendo las componentes de la velocidad (u, v) , [22] Periañez (2010).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -f \times v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \Phi}{\partial x} + N_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -f \times u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial \Phi}{\partial y} + N_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

Las principales variables respecto al eje z fueron promediadas en este eje, por ello su variación respecto a z es despreciable. A continuación, se presenta la Tabla 2 con la descripción de las variables utilizadas.

Variable	Notación	Escala	Valor
Longitud	x, y	L	10^6
Profundidad	z	H	10^3
Velocidad Horizontal	u, v	U	10^{-1}
Velocidad Vertical	w	W	
Presión	p	P	10^7
Aceleración grav.	g	G	10
Parámetro de Coriolis	f	F	10^{-4}
Viscosidad molecular	μ	M	10^{-6}
Coef. Reynolds (x, y)	N_h, N_v	N_h, N_v	10^5
Coef. Reynolds (z)	N_z	N_z	10^{-1}
Densidad	ρ	ρ	10^3

Tabla 2: Escalas y ordenes de magnitud de las variables usadas. Los valores están en SI.

Discretización de las ecuaciones de movimiento

Con el fin de resolver numéricamente las ecuaciones de movimiento se desarrolló un algoritmo en diferencias finitas siendo el esquema de solución el de Upwind, [23] García et al. (2021). Este algoritmo es usado para ondas que intercambian su valor entre positivo y negativo de

sus principales variables de impulso [24] Guzmán (2020), obteniéndose:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u_{i,j}^{k+1} - u_{i,j}^k}{\Delta t}$$

$$u_p = \left(\frac{u_{i,j}^k + |u_{i,j}^k|}{2} \right)$$

$$u_n = \left(\frac{u_{i,j}^k - |u_{i,j}^k|}{2} \right)$$

$$\begin{aligned} ADV_x &= u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \\ &= +u_p \left\{ \frac{u_{i,j}^k - u_{i-1,j}^k}{\Delta x} \right\} \\ &\quad + u_n \left\{ \frac{u_{i+1,j}^k - u_{i,j}^k}{\Delta x} \right\} \end{aligned}$$

$$GP_x = g \left(\frac{\eta_{i,j}^k - \eta_{i-1,j}^k}{\Delta x} \right)$$

$$ROU_x = g \times e^2 \times \frac{u_{i,j}^k \sqrt{(u_{i,j}^k)^2 + (v_{i,j}^k)^2}}{(z_{i,j})^{4/3}}$$

$$WSU_{xx} = \frac{Sxx_{i+1,j} - Sxx_{i,j}}{\rho_w \times \Delta x \times H_{i,j}^k}$$

$$WSU_{xy} = \frac{Sxy_{i,j+1} - Sxy_{i,j}}{\rho_w \times \Delta x \times H_{i,j}^k}$$

$$u_{i,j}^{k+1} = u_{i,j}^k + \Delta t (-ADV_x - GP_x - ROU_x + WSU_{xx} + WSU_{xy})$$

De manera similar se procede a discretizar el campo en el eje y , para el vector velocidad v .

$$v_{i,j}^{k+1} = v_{i,j}^k + \Delta t (-ADV_y - GP_y - ROU_y + WSU_{yy} + WSU_{yx})$$

Ecuación de continuidad

Calculado el módulo de Navier Stokes se resuelve a continuación el módulo de conservación de masa, con el esquema FTBS (Forward Time-Backward Space) sobre el dominio de la zona en estudio. Luego se calcula la propagación del oleaje con el módulo Oluca [6] SMC (2000). El cual soluciona la ecuación parabólica de RefDif, obteniéndose finalmente el campo de corrientes.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (u \times H)}{\partial x} + \frac{\partial (v \times H)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\eta_{i,j}^{k+1} - \eta_{i,j}^k}{\Delta t}$$

$$\begin{aligned} DIV_x &= \frac{\partial (u \times H)}{\partial x} \\ &= \left(\frac{u_{i+1,j}^k \times H_{i+1,j}^k - u_{i,j}^k \times H_{i,j}^k}{\Delta x} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} DIV_y &= \frac{\partial (v \times H)}{\partial y} \\ &= \left(\frac{v_{i,j+1}^k \times H_{i,j+1}^k - v_{i,j}^k \times H_{i,j}^k}{\Delta y} \right) \end{aligned}$$

$$\eta_{i,j}^{k+1} = \eta_{i,j}^k - \Delta t \times (DIV_x + DIV_y)$$

$$H_{i,j}^{k+1} = z_{i,j} + \eta_{i,j}^{k+1}$$

Descripción del modelo numérico SMC y sus principales parámetros

El Sistema de Modelado Costero (SMC) es una interfaz gráfica, la cual proporciona una herramienta computacional en el campo de la ingeniería de costas y Oceanografía. El modelo SMC resuelve el proceso de cálculo numérico que parte de datos de oleaje en aguas profundas, batimetría de detalle y general en aguas profundas. El módulo de propagación del oleaje Oluca incluye el shoaling, refracción y difracción, determinándose el campo de corrientes con ayuda de las ecuaciones de conservación de movimiento y masa. SMC (2000) [6].

Modelo de perturbación del oleaje Oluca-Q

El Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (G.I.O.C.) desarrolló el modelo, Oluca-Q, el cual, a partir del campo de oleaje inicial obtiene los nuevos campos de oleaje, Méndez & Medina, (2005) [25].

Modelo de perturbación del tensor de radiación de corrientes de rotura

De forma paralela a como sucede con el oleaje [26] Barman & Paul (2016), las variaciones del fondo junto con las variaciones de altura de ola y dirección modifican las corrientes de rotura y el nivel medio, ya que el término forzador (tensor de radiación) es perturbado, Aragonés et al. (2017) [27].

Principales variables de calibración del modelo desarrollado

Entre los principales factores de calibración del modelo tenemos a la velocidad inicial perturbada U_o y V_o desde aguas profundas, el número de Courant CFL con el cual se determina el incremento de tiempo dt desde la ecuación de advección en cuanto a que el modelo halla convergencia para CFL menores a 0.4, $dx = 3.53$ m, $dy = 3.65$ m, altura de oleaje de aguas profundas h_s de

2.4 m, dirección de oleaje de 30.05° SSO, Giro y traslación de coordenadas de -30° con el fin de usar coordenadas cartesianas ortogonales y tener mayor dominio computacional (X, Y), el coeficiente de rugosidad de Manning es 0.02 para el cálculo de los esfuerzos cortantes S_{xx} , S_{yy} y S_{xy} , el coeficiente de porosidad del lecho nporo siendo un valor promedio nporo= 0.32, la velocidad cuadrática media resultante $U_{rms} = 1.75$ m/s, el diámetro medio de las partículas del lecho marino $D_{50} = 0.28$ mm, el rango de amplitud de mareas y la influencia de la pendiente de fondo longitudinal y lateral por cuanto el modelo desarrollado converge para pendientes menores al cinco por mil.

Discusión de Resultados

Consideraciones Generales

Se observa la zona de batimetría realizada en torno al puerto girado 30° y la zona de dominio calculado a un $dx = 3.7840$ metros, $dy = 4.5232$ metros, $dt = 0.1374$ seg, el cual converge al sistema numérico para $CFL = 0.40$. El objetivo de girar la batimetría es la de tener mayor dominio computacional, dado que la discretización es en coordenadas cartesianas (x, y) (Figuras 7a y 7b)

Rosa de Oleaje

De los datos temporales de dirección y magnitud se obtiene que la dirección predominante es SSO, con una magnitud de 2.0 m a una probabilidad de ocurrencia del 24 % en el tiempo, y una altura de ola de 2.4 m a una probabilidad de ocurrencia del 14 % en promedio. Además, existe una magnitud pico de 3.0 m a una probabilidad de 8 % en el tiempo. (Figura 8)

Resultados de la Validación del Modelo

El modelo desarrollado en Matlab tiene buen coeficiente de correlación R^2 igual a 89 % respecto a los datos tomados por el ADCP, y del 93 % entre los resultados del modelo SMC y los datos del ADCP. Siendo la media de velocidades de corrientes de los resultados en Matlab de 55.9 mm/s con desviación estándar relativa del 21.4 %, la velocidad promedio del SMC de 55.2 m/s con desviación estándar relativa de 29.1 %, y la velocidad promedio del ADCP es de 41.6 mm/s con desviación estándar relativa de 39 % (Tabla 3 y Figura 9).

La ventaja del modelo en Matlab a diferencia de los softwares de caja negra, es que se puede calibrar con gran número de variables descritas dentro del apartado 2.7, pudiéndose a su vez obtener resultados tanto numéricos como gráficos como se requiera al ser una sub-rutina editable. Lográndose con ello un mayor análisis al proyecto en estudio. Ambos modelos, el SMC y el desarrollado

tienen similares resultados en corrientes. Ambos indican una fuerte concentración de vectores corriente al norte del puerto de ILO.

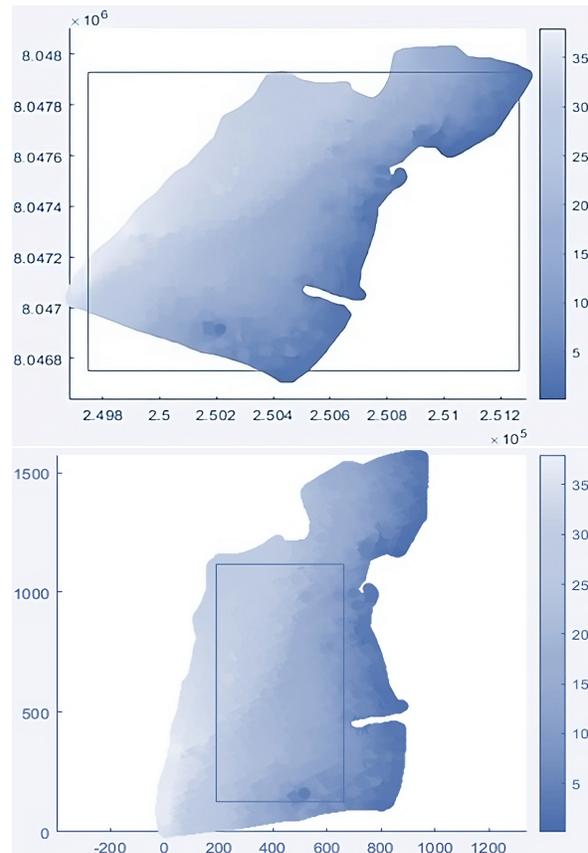


Figura 7: a) Batimetría detalle digital en Matlab del puerto de Ilo. b) Batimetría girada 30° en el sentido contrario al reloj.

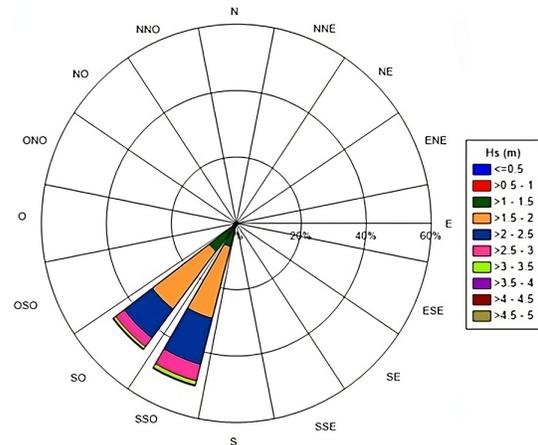


Figura 8: Rosa de oleaje de aguas profundas de la zona cercana al puerto de Ilo. Extraído de ENAPU (2020)

Validación ILO	
Versus	R2
Matlab-ADCP	89.21 %
SMC-ADCP	93.06 %

Tabla 3: Resultados de la Calibración del Modelo desarrollado versus SMC y el ADCP.

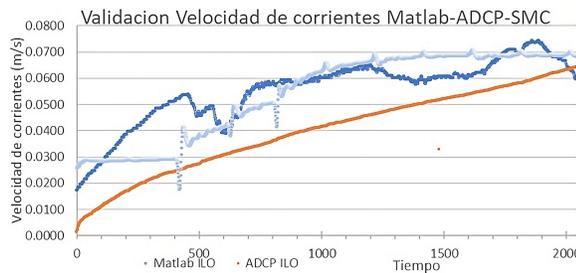


Figura 9: Resultados de la validación por velocidad de rientes Matlab-ADCP-SMC.

Resultados de las corridas del programa numérico de corrientes y olas en Matlab

Se presentan los resultados de las corridas en el programa Matlab, observándose la evolución del oleaje y rientes 2D para el dominio discretizado y girado 30° respecto al norte, con el fin de tener mayor dominio com tacional (Figuras 10a y 10b).

Resultados de la simulación numérica en SMC Mopla

De la Figura 11a, se observa una altura significativa de 1.30 metros en la ubicación del ADCP datos extraídos del estudio de ENAPU. Y de la Figura 11b se observa que existe una concentración de vectores corriente al Norte del puerto de Ilo, lo que podría conllevar a una mayor cantidad de sedimentos en esta zona.

Conclusiones

En este trabajo se determinó la hidrodinámica de corrientes y oleajes del Terminal Portuario (TP) de Ilo, se utilizaron tanto mediciones in situ de batimetría de detalle como modelos numéricos computacionales.

De la observación de los resultados de la rosa de oleaje proveniente de aguas profundas data de la NOAA por el modelo WW3 se determina que el oleaje predominante es de dirección SSO y SO hacia el norte en mayor probabilidad conllevándose a tener un flujo neto de corriente hacia el norte del puerto y erosión al sur de este, debido a la presencia del obstáculo natural de la península de Ilo.

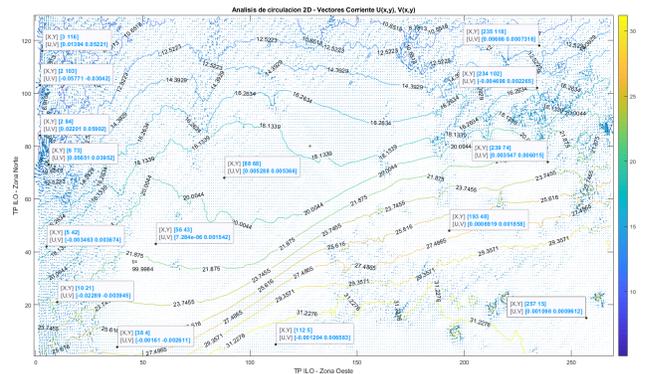
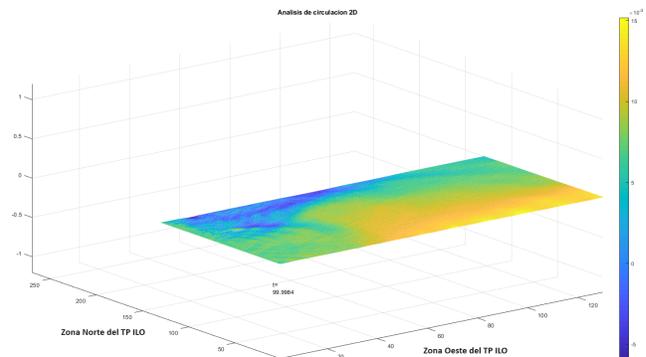


Figura 10: a) Análisis de circulación 2D (x, y) a calado variable z en Matlab. b) Corrientes 2D del puerto de Ilo en programa Matlab.

De los resultados de la simulación numérica en Matlab se determinó que la concentración de corrientes es hacia la zona norte del puerto de Ilo (Figura 11b), y la simulación numérica en SMC se tiene una evolución similar hacia el norte del puerto (Figuras 11a y 11b).

Existe una similitud entre los datos tomados de campo con el ADCP y lo modelado con el SMC del 93 %, siendo la velocidad media del modelo de 55 mm/s y del ADCP de 41.6 mm/s, la velocidad media del modelo desarrollado es de 56 mm/s, las coordenadas del ADCP son: Este: 250268.7 y Norte: 8047305.5, Huso 19 del Perú.

Se recomienda que en futuros trabajos de investigación se realice el cálculo de velocidades de corriente utilizando los valores frecuenciales de distribución del oleaje en el tiempo, con la utilización de la rosa de oleaje. Así se podría obtener una proyección más acertada del cálculo de corrientes en el tiempo, proyectando, por ejemplo, tiempos desde 7200 segundos de corrida por cada probabilidad de oleaje (H altura y dirección Teta probables de oleaje en el delta de tiempo que transcurrió) hacia tiempos reales en un año. Esto daría una evolución más

real proyectada de la posible variación hidrodinámica del TP en un año y compararlo con información tomada de campo con ADCP.

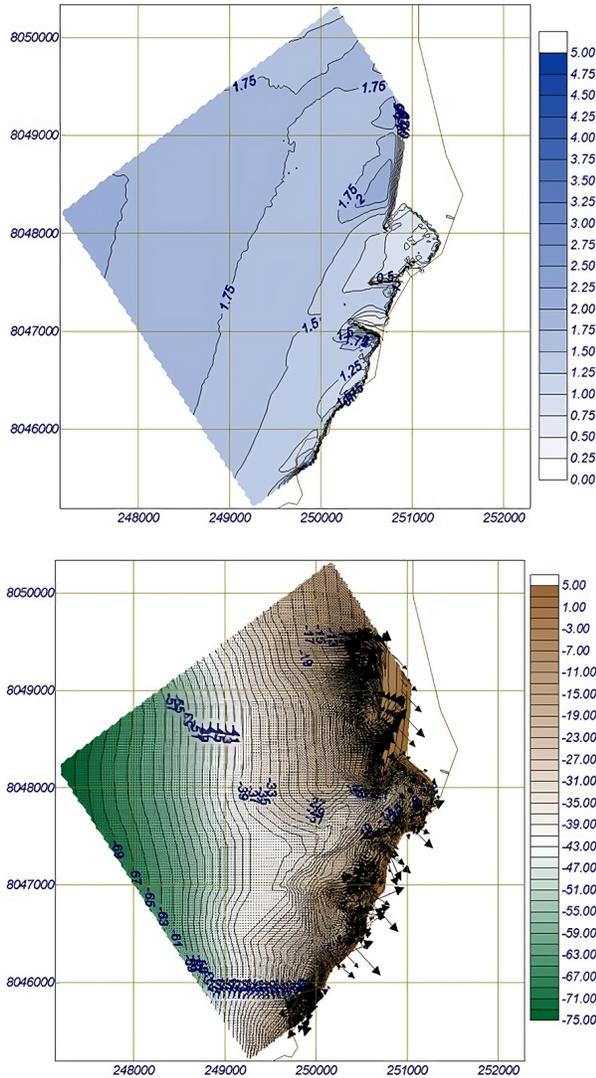


Figura 11: a) Gráfica SMC altura de ola significativa del TP ILO. b) Gráfico SMC de vectores corriente y batimetría del TP ILO.

Agradecimientos

Se hace referencia a la mayor voluntad de apoyo y disposición de la Empresa H&O Ingenieros Consultores S.A. y a la empresa nacional ENAPU quienes facilitaron información relevante en el desarrollo del presente estudio.

Apéndice (Simbología)

C_g = celeridad de grupo (m/s).

c = celeridad de la onda (m/s).

CFL = Número de Courant-Friedrichs-Levy.

$$CFL = \frac{\delta t}{\delta x / \sqrt{g \times h}}$$

dx, dy = Incremento en coordenadas cartesianas de los ejes x, y (m).

dt = Incremento de tiempo (s).

E = Densidad de energía de ola (kg/s^2).

η = Elevación de la ola sobre el nivel de calado medio (m).

h = Calado en un punto del dominio (m).

δh = perturbación del fondo inducida por el transporte (m).

H = Altura total de ola (m).

δH = variación de altura de ola inducida por las variaciones del fondo (m).

θ = ángulo de la onda ($^\circ$).

$\delta \theta$ = variación del ángulo inducida por las variaciones del fondo ($^\circ$).

k = número de onda que cumple la relación de dispersión (m^{-1}).

σ = frecuencia angular de la onda (s^{-1}).

U, v = Velocidades de corrientes en los ejes x, y (m/s).

S_{xx}, S_{yy}, S_{xy} = Esfuerzos cortantes en el lecho marino.

Referencias

- [1] J. Kirby y R. Dalrymple. A parabolic equation for the combined refraction–diffraction of Stokes waves by mildly varying topography. *Journal of Fluid Mechanics*, **136**, 453-466, (1983). <https://doi.org/10.1017/S0022112083002232>
- [2] J. Kirby y R. Dalrymple. Modelling waves in surf-zones and around the islands. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE*. **112** (1986). [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1986\)112:1\(78\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-950X(1986)112:1(78))
- [3] APN. Autoridad Portuaria Nacional, *Plan Maestro del Terminal Portuario de Ilo* (2018), disponible en: <https://webaplicacion.apn.gob.pe/proyecto/wp-content/uploads/2020/10/Plan-Maestro-Portuario-TP-IL0.pdf>
- [4] G. Solís, A. Guillén, A. Pilares, E. Saldaña, A. Werner. *Plan Estratégico del Terminal Portuario de Ilo, Tesis de Magister de Centrum PUCP*, (2011).
- [5] B. Jigena, A. Arranz, A. Jigena, J. Monedero. Estudio del transporte marítimo y la explotación de la terminal de contenedores del Puerto de Cádiz (Study of the Maritime Transport and operation of Cádiz Port Container Terminal, Editorial Dykinson (Madrid), 1ra. Edición, **59**, (115) 1250-1274, ISBN: 978-84-1122-829-9, (2023). <http://hdl.handle.net/10498/31756>
- [6] SMC. Universidad Cantabria. Sistema de modelado costero, Manual de usuario SMC 3.0, Modelo de oleaje, corrientes y evolución morfológica de una playa, Manual de referencia Eros 3.0, Modelo de erosión/sedimentación, Documento de referencia, volumen I, II, III, IV, V – Dinámicas, procesos litorales, obras, medio ambiente litoral, Apéndices, GIOC, UC, (2000).
- [7] A. Mahmoodi, M. Lashteh, A. Mansouri, M. Shafai. Study of Current- and Wave-Induced Sediment Transport in the Nowshahr Port Entrance Channel by Using Numerical Modeling and Field Measurement, *Journal of Marine Science and Engineering* (2020), <https://www.mdpi.com/2077-1312/8/4/284>
- [8] V. Leys y R. Mulligan. Modelling Coastal Sediment Transport for Harbour Planning: Selected Case Studies, CBCL Limited Consulting Engineers, Halifax NS 2East Carolina University, Greenville NC, (2015).
- [9] A. Bennis, L. Furgerot, P. Bailly-Du Bois, F. Dumas, T. Odaka, C. Lathuilière, J. Filipot. Numerical modelling of three-dimensional wave-current interactions in complex environment: Application to Alderney Race. *Appl. Ocean Res.* **95**, (2020). <http://dx.doi.org/10.1016/j.apor.2019.102021>
- [10] C. Calvino, T. Dabrowski & F. Dias. A study of the wave effects on the current circulation in galway bay, using the numerical model COAWST. *Coastal Engineering (Amsterdam)*, **180**, (2023). <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104251>
- [11] B. Jigena-Antelo, C. Estrada-Ludeña, S. Howden, W. Rey, J. Paz-Acosta, P. Lopez-García, E. Salazar-Rodriguez, N. Endrina, J. Muñoz-Pérez. Evidence of sea level rise at the Peruvian coast (1942–2019). *Science of The Total Environment*, **859**, Part 2, (2023b), <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160082>
- [12] B. Jigena, J. Vidal and M. Berrocoso. Determination of the tide constituents at Livingston and Deception Islands (South Shetland Islands, Antarctica), using annual time series. **82**(191), 209-218, (2015). <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n191.45207>
- [13] F. Ardhuin, A. Roland, F. Dumas, A. Bennis, A. Sentchev, P. Forget, J. Wolf, F. Girard, P. Osuna, M. Benoit. Numerical wave modeling in conditions with strong currents: Dissipation, refraction, and relative wind. *J. Phys. Oceanogr.* **42**(12), 2101–2120. (2012). <http://dx.doi.org/10.1175/JPO-D-11-0220.1>
- [14] M. Olabarrieta, J. Warner, N. Kumar. Wave-current interaction in Willapa Bay. *J. Geophys. Res.: Oceans* **116**(C12), (2011). <https://doi.org/10.1029/2011JC007387>
- [15] L. Renault, M. Molemaker, J. McWilliams, A. Shchepetkin, F. Lemarié, D. Chelton, S. Illig, A. Hall. Modulation of wind work by oceanic current interaction with the atmosphere. *J. Phys. Oceanogr.* **46** (6), 1685–1704, (2016). <https://doi.org/10.1175/JPO-D-15-0232.1>
- [16] E. Guzmán. Modelamiento de corrientes superficiales inducidas por viento y marea en la bahía Ferrol-Chimbote, (2006). <https://hdl.handle.net/20.500.12672/2535>
- [17] H. Varona y N. Alemán. Corrientes Marinas en el Tramo Costero Cazonal-Cazonalito". *Ciencia en su PC*, **IV**(4), (1999). <https://hal.science/hal-04033150/document>

- [18] J. Muñoz-Perez, J. Gutierrez-Mas, J. Parrado, & L. Moreno. Sediment transport velocity by tracer experiment at Regla Beach (Spain). *Journal of waterway port, coastal, and ocean engineering*, **125**(6), 332-335, (1999). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1999\)125:6\(332\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1999)125:6(332))
- [19] G. Gómez-Pina, L. Fages, J. Ramírez, J. Muñoz-Pérez, & J. Enriquez. A critical review of beach restoration projects in the northern coast of Cadiz (Spain) after thirteen years. *Coastal Engineering* 2006: (5, 4167-4178, (2007). https://doi.org/10.1142/9789812709554_0350
- [20] J. Muñoz-Pérez, I. Caballero, B. Tejedor, & G. Gomez-Pina. Reversal in longshore sediment transport without variations in wave power direction. *Journal of Coastal Research*, **26**(4), 780-786, (2010). <https://doi.org/10.2112/08-1141.1>
- [21] ENAPU PERU. Estudio de pre inversión del proyecto a nivel perfil vinculado al mejoramiento de las facilidades portuarias en el terminal portuario de Ilo, Informe Final: Estudio de oleaje, Estudio Meteorológico y Estudio de transporte de sedimentos, Elaborado por: Consorcio Puerto Ilo Incostas y H&O S.A. Código del documento: CPI-01-TS-IN-001, CPI-01-TP-IN-001 y CPI-01-OC-IN-003, (2021).
- [22] R. Periañez. *Fundamentos de Oceanografía Dinámica*. Universidad de Sevilla, España. ISBN 978-84-472-1235-4, (2010).
- [23] P. García, A. Navas, J. Fernández. *Introducción a la Mecánica de Fluidos Computacional*. Prensas de la Universidad de Zaragoza, España ISBN 978-84-1340-233-8, (2021).
- [24] E. Guzmán. Notas del curso Modelamiento de Sistemas Marítimos y Costeros, Lima-Perú, (2020).
- [25] R. Méndez & P. Medina. A Perturbation Method for Wave and Wave-Induced Currents Computations in Beach Morphology Models, **77**, 393-402, (2005). [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40566\(260\)40](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40566(260)40)
- [26] N. Barman & A. Paul, *Coastal Morphodynamics Integrated Spatial Modeling on the Deltaic Balasore Coast*, India. **109**, ISBN 978-3-319-33574-2, (2016).
- [27] L. Aragonés, I. López, E. Gómez-Martín, A. Jodá, S. García. *Ingeniería Marítima I*, Editorial Club Universitario, ISBN 9788416966479, España, (2017).