

# Evaluation of Port Infrastructure in the face of Wave Agitation and Climate Change, Applying Numerical Models. Case Study: Manta Port Terminal, Ecuador

Iván Saltos-Andrade, MSc.<sup>1,2</sup>; Nicole Ramírez-Ruiz, Ing.<sup>1</sup>; María Chuez-Cedeño, Ing.<sup>1</sup>; Carlos Martillo-Bustamante, Ph.D.<sup>1,2</sup>; Gina Andrade-García, MSc.<sup>1,2</sup>; Jonathan Cedeño-Oviedo, MSc.<sup>1,2</sup>; Eduardo Cervantes-Bernabé, MSc.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar.

<sup>2</sup> Grupo de Investigación en Geociencias Marinas y Costeras (GEMAC), Guayaquil, Ecuador, jsaltos@espol.edu.ec, nilirami@espol.edu.ec, mfchuez@espol.edu.ec, cmartill@espol.edu.ec, gandrade@espol.edu.ec, jcedeno@espol.edu.ec, ecervan@espol.edu.ec

*Abstract- Port activity is important for economic development in many coastal zones, however, the structures that protect ports need to be tested against extreme wave events because the effects of climate change will increase the frequency and intensity. To be efficient in its operations, a safe docking of ships is essential into a port terminal, however, waves can generate disturbances that cause logistical delays and economic losses. Under this premise, the present study analyzes wave agitation inside the Manta Port Terminal (TPM) using computational models. First, an extreme wave event such as ENSO 1997-1998 is recreated and then possible extreme scenarios by 2050 and 2100 (including climate change) are simulated. These scenarios are evaluated with and without modifications of the port breakwater to analyze the level of protection it would offer in future scenarios. Results obtained from the SW module show the angles that affect the breakwater are 67% to the range of 300°-330° and 2% in the range of 1°-30°, this last range being the one that further agitation causes inside the port. Also, the results from the BW module show that for the ENSO 1997-1998 event (without breakwater modification), the levels of agitation exceed 0.5 m in the docks for waves that arrive with 15°, this being the threshold value with which can carry out loading and unloading operations to the different vessels within the TPM. It is also observed that these disturbance levels will be greater towards the years 2050 and 2100, generating greater problems, if no additional modifications to the breakwater are considered to mitigate these impacts. The proposals for modifications to the breakwater, evaluated with the numerical model, show that it protects the docks from the TPM, reducing the levels of agitation within the berths by 14% compared to 15° waves.*

**Keywords:** Port infrastructure, climate change, waves, ENSO, logistics, marine transport, computational models.

**Digital Object Identifier (DOI):**

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.96>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

# Evaluación de Infraestructura Portuaria ante la Agitación del Oleaje y Cambio Climático, Aplicando Modelos Numéricos. Caso de Estudio: Terminal Portuaria de Manta, Ecuador.

Iván Saltos-Andrade, MSc.<sup>1,2</sup>; Nicole Ramírez-Ruiz, Ing.<sup>1</sup>; María Chuez-Cedeño, Ing.<sup>1</sup>; Carlos Martillo-Bustamante, Ph.D.<sup>1,2</sup>; Gina Andrade-García, MSc.<sup>1,2</sup>; Jonathan Cedeño-Oviedo, MSc.<sup>1,2</sup>; Eduardo Cervantes-Bernabé, MSc.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar.

<sup>2</sup> Grupo de Investigación en Geociencias Marinas y Costeras (GEMAC), Guayaquil, Ecuador, jsaltos@espol.edu.ec, nilirami@espol.edu.ec, mfchuez@espol.edu.ec, cmartill@espol.edu.ec, gandrade@espol.edu.ec, jcedeno@espol.edu.ec, ecervan@espol.edu.ec

**Resumen-** La actividad portuaria es importante para el desarrollo económico en distintas localidades costeras, sin embargo, los efectos del cambio climático van a poner a prueba las estructuras de protección que poseen frente a eventos extremos de oleajes, en gran parte debido a que cada vez serán más frecuentes y de la mayor intensidad. Para que una terminal portuaria sea eficiente en sus operaciones, es fundamental un atraque seguro de los buques, sin embargo, el oleaje puede generar perturbaciones que ocasionan retrasos logísticos y pérdidas económicas. Bajo esta premisa, el presente estudio analiza la agitación del oleaje dentro de la Terminal Portuaria de Manta (TPM), a partir del uso de modelos computacionales. Para ello, primero se recrea un evento extremo de oleaje ocurrido en El Niño 1997-1998 y posteriormente posibles escenarios extremos hacia los años 2050 y 2100 incluyendo el cambio climático. Posteriormente, se evalúan estos escenarios con el actual rompeolas que protege a la terminal portuaria y se realizan modificaciones para analizar el nivel de protección que ofrecería ante los escenarios futuros. Los resultados obtenidos con el módulo SW muestran que los ángulos que inciden sobre el rompeolas son en un 67% correspondientes al rango de 300°-330° y del 2% en el rango de 1°-30°, siendo este último rango el que mayor agitación causa dentro del puerto. Los resultados obtenidos con el módulo BW muestran que para el evento ENSO 1997-1998 (sin modificar rompeolas) los niveles de agitación sobrepasan los 0.5 m en los atracaderos para el oleaje que arriba con 15°, siendo este valor el umbral con el que se puede realizar operaciones de carga y descarga a los diferentes buques dentro de la TPM. Se observa también que estos niveles de perturbación serán mayores hacia los años 2050 y 2100 generando mayores problemas, siempre y cuando no se consideren modificaciones adicionales al rompeolas para mitigar estos impactos. Las propuestas de modificaciones al rompeolas, evaluadas con el modelo numérico, muestran que protege a los muelles de la TPM, reduciendo en un 14% los niveles de agitación dentro de los atracaderos respecto al oleaje de 15°.

**Palabras claves:** Infraestructura Portuaria, cambio climático, oleaje, ENSO, logística, transporte marítimo, modelos computacionales.

**Abstract-** Port activity is important for economic development in many coastal zones, however, the structures that protect ports need to be tested against extreme wave events because the effects of climate change will increase the frequency and intensity. To be efficient in its operations, a safe docking of ships is essential into a port terminal, however, waves can generate disturbances that cause logistical delays and economic losses. Under this premise, the present study analyzes wave agitation inside the Manta Port Terminal (TPM) using computational models. First, an extreme wave event such as ENSO 1997-1998 is recreated and then possible extreme scenarios by 2050 and 2100 (including climate change) are simulated. These scenarios are evaluated with and without modifications of the port breakwater to analyze the level of protection it would offer in future scenarios. Results obtained from the SW module show the angles that affect the breakwater are 67% to the range of 300°-330° and 2% in the range of 1°-30°, this last range being the one that further agitation causes inside the port. Also, the results from the BW module show that for the ENSO 1997-1998 event (without breakwater modification), the levels of agitation exceed 0.5 m in the docks for waves that arrive with 15°, this being the threshold value with which can carry out loading and unloading operations to the different vessels within the TPM. It is also observed that these disturbance levels will be greater towards the years 2050 and 2100, generating greater problems, if no additional modifications to the breakwater are considered to mitigate these impacts. The proposals for modifications to the breakwater, evaluated with the numerical model, show that it protects the docks from the TPM, reducing the levels of agitation within the berths by 14% compared to 15° waves.

**Keywords:** Port infrastructure, climate change, waves, ENSO, logistics, marine transport, computational models.

## I. INTRODUCCIÓN

Los puertos representan el 80% del comercio a nivel mundial y estos debido a su ubicación se pueden ver afectados a condiciones naturales como oleajes y aguajes, que pueden afectar sus actividades de carga y descarga de mercaderías [1]. La reciente crisis global en la cadena de suministros (debido al COVID-19) dejó ver como la ralentización de las operaciones de los puertos generó escasez de ciertos productos, congestión de mercaderías, crisis energética, entre otros problemas que perjudicaron las economías a nivel mundial [2]. Para que una terminal portuaria sea eficiente en sus operaciones es fundamental un atraque seguro de los buques y entre las principales causas que ocasionan interrupciones en la manipulación de carga dentro de un puerto tenemos que el 50% se debe a condiciones climáticas, en las cuales,

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.96>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

el 20% corresponde a lluvias y el 30% al oleaje [3].

La economía ecuatoriana depende en gran medida de las actividades portuarias, y la Terminal Portuaria de Manta (TPM) tiene un papel importante, ya que su posición geográfica (Fig. 1) facilita la conexión entre Europa y África a través del canal de Panamá, permitiendo también el atraque de buques con un calado máximo de 12.5 m respecto al MLWS. Sin embargo, entre los meses de diciembre a marzo se presentan fuertes oleajes y aguajes en la costa ecuatoriana [4] generando un impacto negativo en las operaciones de la TPM. Esta terminal se encuentra expuesta de forma no recurrente al oleaje proveniente del norte (Fig. 2b), el mismo que ingresa directamente a los muelles donde se encuentran atracados los buques generando balanceo y la ruptura de las líneas de amarre y cornamusas (Fig. 3). Esto ocasiona que los buques deban redirigirse al exterior de las instalaciones para su fondeo ocasionando retrasos significativos en las operaciones y logística del puerto y generando pérdidas económicas entre 5000 a 10000 dólares por buque/día en caso de que este decida no ingresar a muelle.

Bajo estos antecedentes, el presente trabajo analiza el oleaje incidente del norte, desde su generación (viento-fetch), transformación, asomeramiento y arribo a los muelles de la TPM, para de esta forma evaluar las perturbaciones que ocurren dentro de la terminal en condiciones normales y extremas (ej. incremento del nivel medio del mar y eventos ENSO) y sus posibles impactos hacia los años 2050 y 2100. Para alcanzar este objetivo, se realizan simulaciones computacionales utilizando MIKE 21 SW y BW. Los datos de olas son obtenidos por medio de la plataforma WAVEWATCH III (1997-2019). La transformación del oleaje se analiza utilizando el módulo espectral (MIKE 21SW), mientras que la agitación de olas dentro del puerto se evalúa con el módulo de Boussinesq (MIKE 21BW) [5]. A partir de los resultados, se evalúan también modificaciones al rompeolas (espigón de protección del puerto: Caso 1 y 2) (Fig. 7), con el fin de analizar alternativas de ingeniería que permitan reducir la perturbación dentro de los muelles de la TPM.

#### A. Área de Estudio

La Terminal Portuaria de Manta (TPM) está ubicada en la ciudad de Manta, provincia de Manabí y se sitúa a 35 millas náuticas de la ruta internacional de tráfico y a 600 millas náuticas del Canal de Panamá [6]. Es considerada una terminal multipropósito (Fig. 1), puesto que moviliza carga a granel sólido, graneles líquidos y carga general [7], además capta el tráfico de las rutas del lejano oriente y del continente americano, en especial las que están relacionadas a la costa del Pacífico [6].

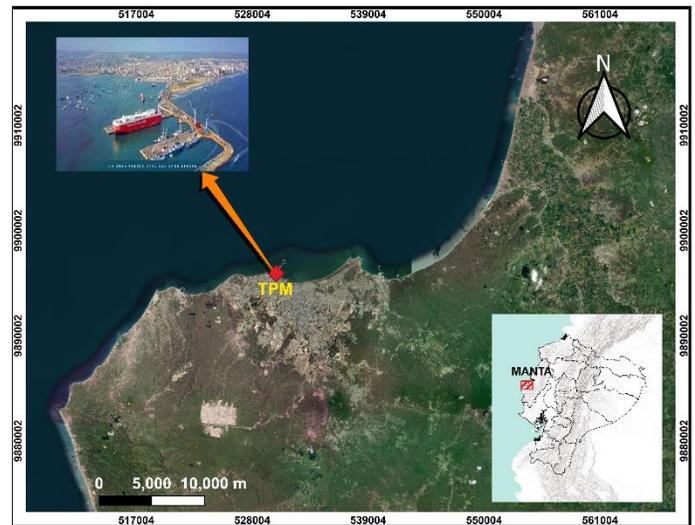


Fig. 1. Ubicación de la Terminal Portuaria de Manta (TPM)

#### B. Características Geológicas

De acuerdo con Soledispá et al. [8], en Manta existen acantilados entre 30 a 50 m de altura, de mediano ángulo e inestables, conformados por rocas blancas. Por otra parte, la playa está cubierta de arena fina con presencia de areniscas que se pueden observar en bajamar. El mismo estudio muestra que, de acuerdo con la clasificación de diámetro medio ( $d_{50}$ ), en el lado este del espigón predominan las arenas muy finas, al noroeste del rompeolas las arenas finas y dentro de los muelles internacionales los limos de grano grueso.

#### C. Características Meteorológicas

El clima en la zona de estudio presenta variaciones poco significativas de temperatura (entre 24 °C a 26 °C) a lo largo del año, esto se debe porque está situada en la región ecuatorial considerada isotermal [9]. La presión atmosférica varía en un rango de 1008 mbar a 1012 mbar aproximadamente. La Temperatura Superficial del Mar muestra que los meses más cálidos (época de lluvias) corresponden a febrero y marzo, (promedio 27.3 °C) y los meses de menor temperatura en la época seca, con temperatura de 24.5 °C, siendo agosto el mes más frío [10]. Durante el evento de El Niño 1997-1998 se registraron los años más cálidos, con un promedio anual de 27.0 °C y 27.1 °C [11].

#### D. Oleaje

A la Terminal Portuaria de Manta (TPM) en condiciones normales pueden arribar frentes de ondas provenientes del Sur (Fig. 2a), Oeste y Norte (Fig. 2b). Sin embargo, las direcciones Sur (S) y Suroeste (SO) arriban al puerto con menor energía debido al proceso de refracción. No así, el oleaje proveniente del Norte (N) o Noroeste (NO) que ingresa de una forma más directa a la Terminal sin disipar mucha energía por la refracción. Adicionalmente, durante El Niño 1997-1998 [12], se observó que las alturas y períodos de olas provocadas por tormentas en el Pacífico Norte, generaron un incremento significativo en la altura de ola que llega al puerto (Tabla I).

b) Oleaje proveniente del norte.

Tabla I  
VARIACIÓN DE ALTURA DE OLA, MAREA Y CORRIENTE EN CONDICIONES NORMALES Y ENSO 1997-1998 [12] [13] [14] [15]

Variables	Condiciones normales	ENSO (1997-1998)
Altura Significativa de Ola	0.3 a 0.6 m	1.54 m
Mareas	2.65 m	3.02 m
Corriente	0.5 m/s	>1 m/s

A partir de los datos del oleaje (WAVEWATCH III), se obtuvo la altura significativa y dirección media de ola desde 1997 hasta 2019 (Fig.2) evidenciándose que en la costa ecuatoriana las direcciones predominantes son Sur (S) y Suroeste (SO) (Fig.2a) y en con menor porcentaje de ocurrencia se tiene la dirección del Noroeste (NO) (Fig.2b).

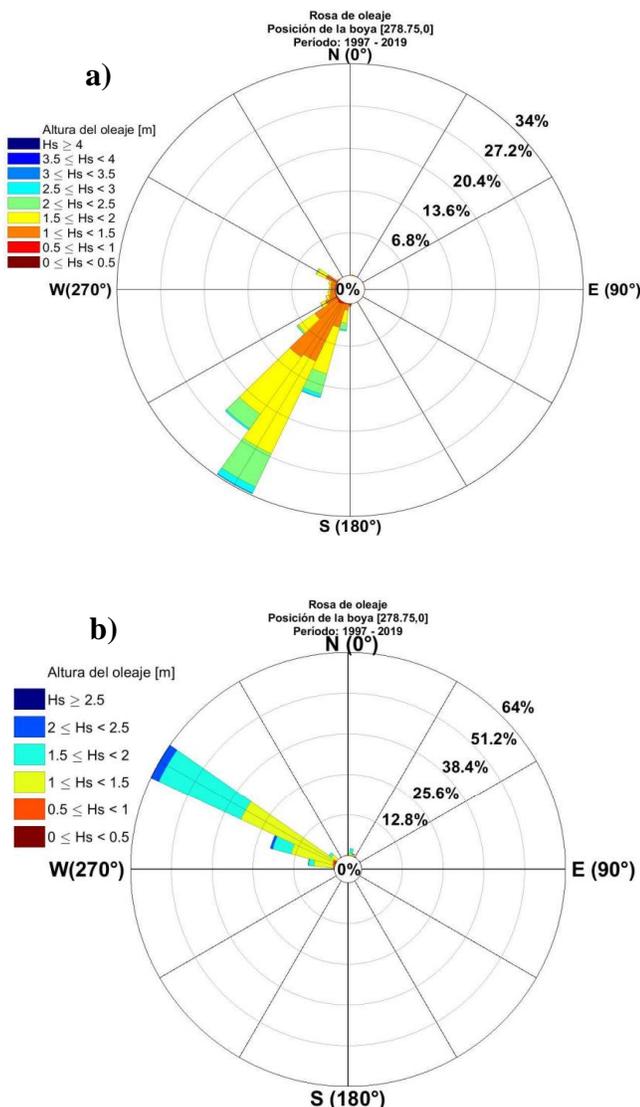


Fig. 2 Rosa de oleaje para el período de 1997-2019 (WAVEWATCH), con altura de ola significativa y dirección: a) Oleaje proveniente de todas las direcciones y

E. Nivel del Mar y Cambio Climático

Un estudio realizado por Contreras et al. [16], da conocer los efectos de cambio climático en el nivel del mar y oleaje a partir del análisis de inundaciones en la zona costera ecuatoriana en relación con el desarrollo de El Niño. Por ende, se observa en la Tabla II los incrementos esperados para los años 2050 y 2100.

Tabla II  
INCREMENTOS ESPERADOS PARA LOS AÑOS 2050 Y 2100 EN LA ZONA DE ESTUDIO [16]

Variables	2050	2100
Nivel Medio del Mar	+ 4 cm	+9.5 cm
Altura Significativa de Ola	+ 53 cm	+1.26 cm

F. Muelles de atraque de la Terminal Portuaria de Manta (TPM)

La TPM posee 2 muelles internacionales (multipropósito) que permiten el atraque de todo tipo de buques con calado máximo de 12.5 m (Tabla III y Fig.3a). Algunas de las actividades que desarrolla el puerto son carga, descarga, avituallamiento, servicio de seguridad y movilidad en la llegada de cruceros turísticos.

Tabla III  
CARACTERÍSTICAS DE LOS MUELLES Y DIQUE DE ABRIGO

Muelle #1	Dimensión: 200 m × 45 m Resistencia: 4 t/m Atracadero # 1: 11.5 m (MLWS) Atracadero # 2: 12.5 m (MLWS)
Muelle #2	Dimensión: 300 m × 45 m Resistencia: 4 t/m Atracadero # 3 y 4: 12.5 m (MLWS)
Dique de abrigo	<u>Espigón</u> Longitud: 683.51 m <u>Rompeolas</u> Longitud: 313.98 m

Dentro de los muelles de la TPM se presentan estas perturbaciones (agitaciones) provocadas por el oleaje del norte que produce el rompimiento de las líneas de amarre (Fig.3c) generando retrasos en las operaciones (transporte) y pérdidas económicas.

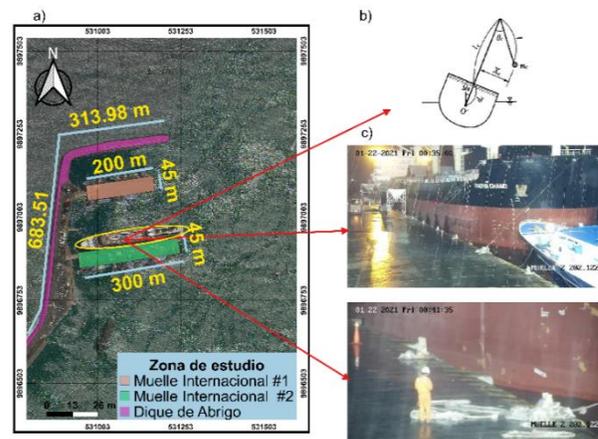


Fig. 3 (a) Muelles Internacionales de atraque TPM. (b) Cargo swing [3]. (c) Rompimiento de las líneas de amarre del Buque Granelero Darya Chand por efecto del oleaje dentro de los muelles.

## II. MÉTODOS Y DATOS

### A. ETAPA 1: Generación de los archivos de entrada en MIKE ZERO.

La primera etapa consistió en obtener los archivos de entrada como batimetría (digitalización), malla, series de tiempo, condiciones de borde, entre otras, para la configuración de los módulos SW y BW. Para digitalizar la batimetría, primero se definió el área de estudio tanto para el módulo SW y BW (Fig. 4a y 4b).

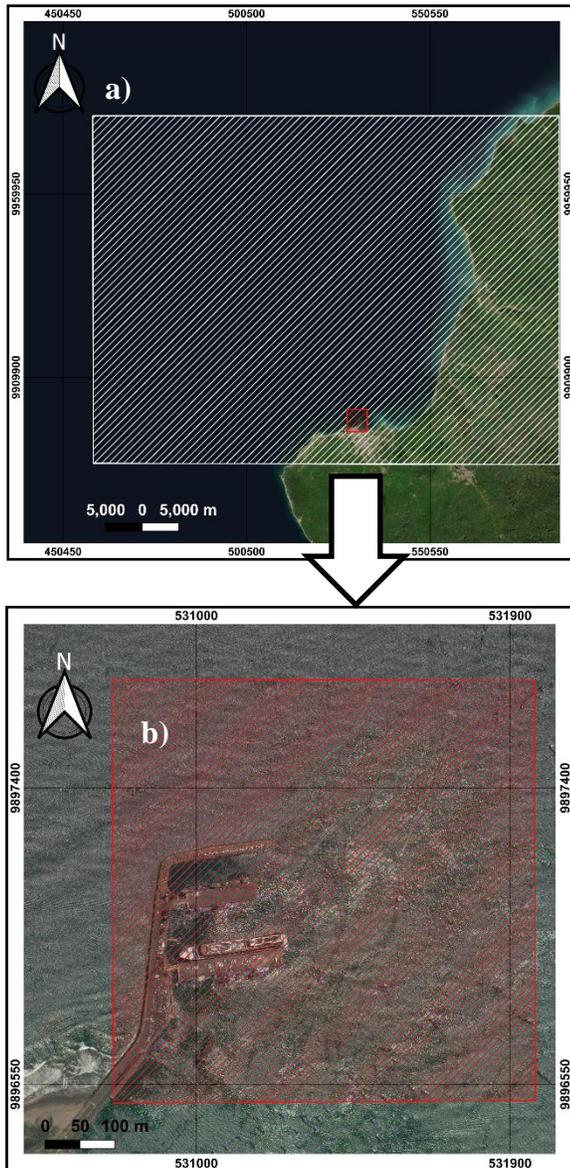


Fig. 4 a) Área de estudio definida para el módulo de MIKE 21SW. b) Área de estudio definida para el módulo de MIKE 21 BW.

Posteriormente, se procede a importar las cartas náuticas IOA103 y IOA104 con resolución de 1:50000 (SW) y IOA104010 con resolución de 1:2500 (BW), en donde se digitaliza la franja de tierra y la batimetría (archivos \*.xyz tierra y agua). Para la generación de la malla se crea un archivo \*.mdf en el cual se importan los 2 archivos \*.xyz (tierra y agua) y

posteriormente, se definen las condiciones de borde a través de los arcos con sus respectivos códigos y finalmente, se genera la malla flexible con la interpolación de la batimetría (Fig. 5a). Por otro lado, es importante detallar que el modelo BW no se hace uso de mallas, sino solo de batimetría (Fig. 5b).

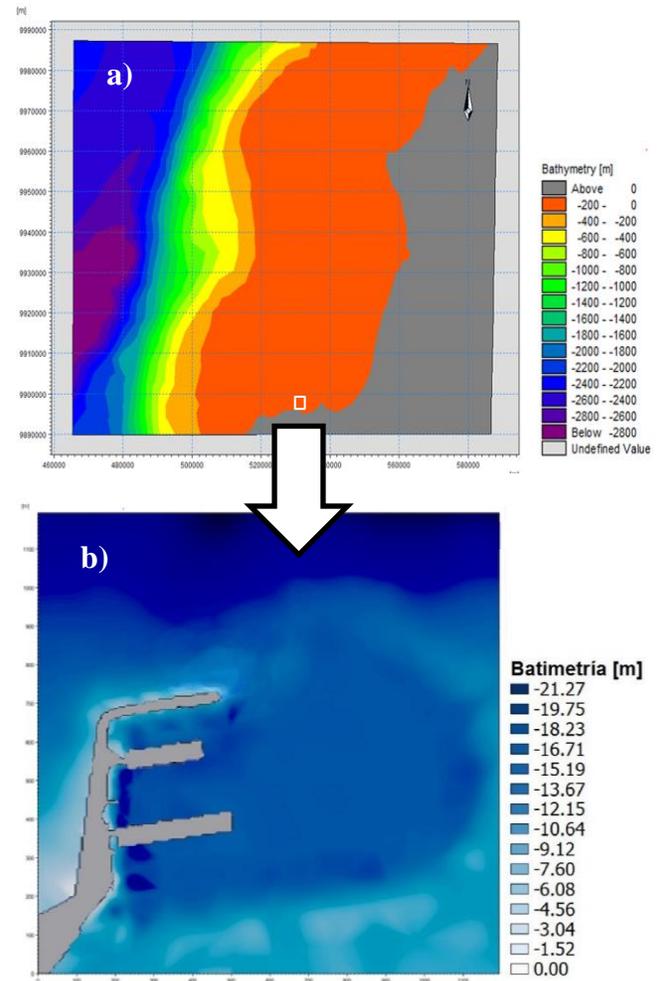


Fig. 5 a) Batimetría generada para el módulo SW; b) Batimetría generada para el módulo BW.

Las series de tiempo del clima de olas (altura significativa, periodo pico y dirección) y las variables de viento (velocidad y dirección) para el SW, son definidos a través de los archivos extensión dfs0. La caja de herramientas permitió generar archivos de onda interna, capa porosa y capa de esponja para el módulo BW. También, se ingresan parámetros de olas (altura significativa, periodo pico, profundidad y dirección), tanto para la generación de la onda interna en aguas en transición como cerca del rompeolas. Como resultado, proporciona archivos de extensión dfs0, dfs1 y dfs2.

## B. ETAPA 2: Transformación del oleaje y agitación dentro del puerto.

El módulo SW permite transformar el oleaje de aguas profundas (veril de 3200m) a someras (veril de 20m), mientras que el módulo BW permite evaluar las perturbaciones dentro de la terminal portuaria. Los datos utilizados para la transformación del oleaje (altura significativa, periodo pico y dirección media de ola) fueron obtenidos a partir del WAVEWATCH III, desde el año 1997 hasta el 2019 en la boya ubicada en 81°23'16.55" O y 0°0'3.73" N (norte de Manta).

Para la configuración de los parámetros de ambos módulos, se utilizó información bibliográfica disponible para zona de estudio. El estudio desarrollado por Vera [12] presenta registros (olígrafo fondeado en veril 20m) de parámetros como altura significativa de ola y periodo pico para el periodo El Niño 1997-1998 en Jaramijó (8 km del puerto TPM). Esta información, sirvió para calibrar y validar los archivos de salida del módulo SW. Además, para determinar el diámetro medio del sedimento ( $d_{50}$ ) ubicado en el lado este del espigón y dentro de los muelles de la TPM se utilizó el estudio de Soledispa et al. [8].

De acuerdo con Vera [12], durante el evento El Niño se presentó un incremento en el nivel medio del mar y esto también generó un incremento en la altura significativa de ola. Es importante destacar que estos escenarios extremos van a incrementarse hacia los años 2050 y 2100 según el estudio de Contreras et al. [16] (Tabla II). Por ello, el primer paso consistió en recrear el evento extremo ENSO 1997-1998 utilizando el módulo SW (calibración y validación) y posteriormente generar posibles escenarios extremos hacia los años 2050 y 2100 de acuerdo con Contreras et al. [16]. Finalmente, los datos de salida del módulo SW se ingresaron al módulo BW para obtener el coeficiente de perturbación en los atracaderos de la TPM. Los valores de difracción del BW fueron comparados con las fórmulas del Shore Protección Manual (SPM 84) [17].

## C. ETAPA 3: Generación de escenarios.

### C.1. Escenarios de Oleajes (ENSO).

Una vez calibrados y validados los módulos SW y BW, se procedió a la generación de escenarios de oleaje que incluyan condiciones extremas con el Cambio Climático [16] y [18]. Los escenarios analizados fueron en condiciones extremas que han sucedido (ENSO 1997-1998), condiciones extremas hacia el año 2050 (ENSO 2050) y 2100 (ENSO 2100). La dirección de arribo de los frentes de ondas está vinculado a la batimetría y, por ende, se conservó los mismos ángulos de arribo que mayor problema han causado a la terminal portuaria (330° y 15°) (Fig. 6).

### C.2. Escenarios con modificaciones al rompeolas (Caso 1 y 2).

Con la finalidad de evaluar posibles diseños de protección frente a escenarios futuros (Cambio Climático 2050 y 2100) dentro de la TPM, se realizaron 2 modificaciones (Caso 1 y Caso 2), a fin de analizar el nivel de protección que ofrecerían a la terminal portuaria. El caso 1 considera un alargamiento de 200 m (Fig. 7a) y el caso 2 un alargamiento de 200 m y extensión de 100 m (Fig. 7b).

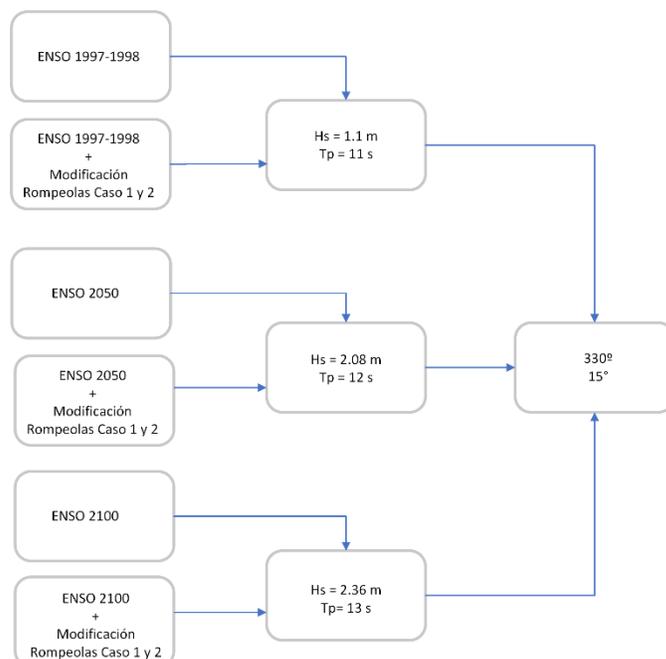


Fig. 6 Escenarios de oleaje (ENSO) incluyendo modificación rompeolas (Caso 1 y 2), utilizados para el estudio de agitación dentro de la TPM (módulo BW), de acuerdo con Contreras et al. [16] (Tabla II).

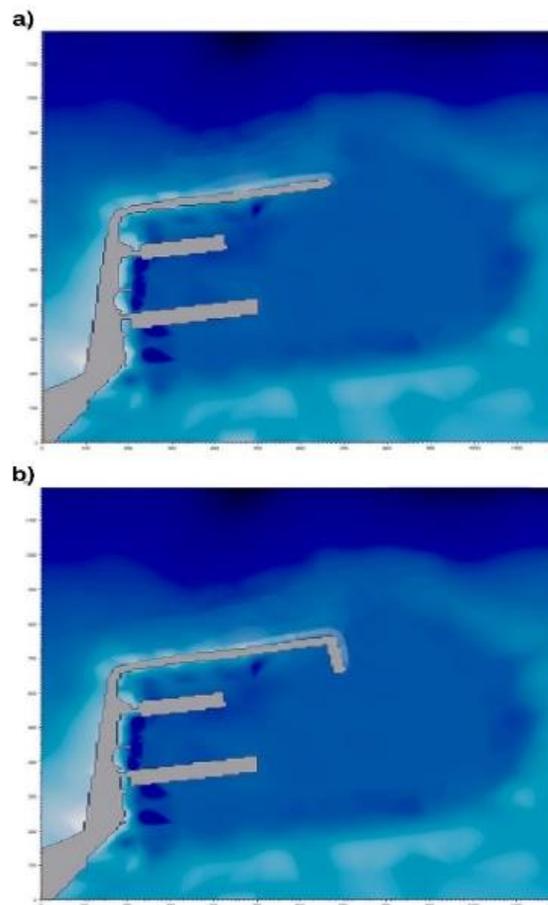


Fig. 7 Modificaciones al rompeolas de la TPM a) Caso 1: Alargamiento de 200 m. b) Caso 2: Alargamiento de 200 m y extensión de 100 m.

### III. RESULTADOS

Los resultados obtenidos con el módulo SW se los comparó con los registros de Vera [12] en la cual se observa una buena correlación para la altura significativa de ola y periodo pico (Tabla IV), con un rango de dirección media predominante entre 310° y 330°.

TABLA IV  
COMPARACIÓN DE RESULTADOS  
ENTRE MIKE 21SW Y EL INOCAR [12]

ALTURA DE OLA [metros]				
Parámetro	INOCAR		SW	
	Feb-1997	Feb-1998	Feb-1997	Feb-1998
$H_{1/3}$	1.32	1.54	1.38	2.04
PERIODO PICO [segundos]				
Parámetro	INOCAR		SW	
	Feb-1997	Feb-1998	Feb-1997	Feb-1998
$T_p$	23	23	17.4	19.2

Del mismo modo, se compararon los resultados de altura de ola difractada por el rompeolas de la TPM entre el módulo BW y las fórmulas del Shore Protection Manual (SPM 1984) [17]. La ubicación geográfica de los puntos comparados entre el módulo BW y SPM 84 se encuentra en la Fig.8 y la Tabla V muestra los resultados de la comparación con una buena correlación de apenas una diferencia de 0.05 m.

TABLA V  
COMPARACIÓN DE RESULTADOS  
ENTRE MIKE 21BW Y EL SPM 1984

Coordenadas UTM [m]	SPM 1984 [m]	BW [m]
P1 [531121, 9896926]	0.23	0.25
P2 [531145, 9897124]	0.22	0.19
P3 [531082, 9897116]	0.13	0.18
P4 [531053, 9897112]	0.11	0.15

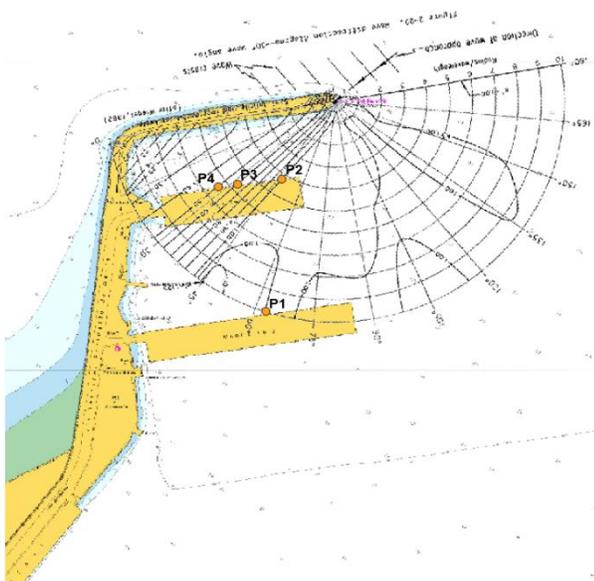


Fig. 8 Ubicación geográfica de los Puntos (P1, P2, P3, P4) comparados (resultados) entre MIKE 21 BW y SPM 84 (diagramas de difracción).

Posterior a la validación de resultados de los módulos SW y BW, se procedió a analizar el nivel de agitación dentro de los muelles de la TPM ubicando 4 puntos en los atracaderos como se muestra en la Fig.9.

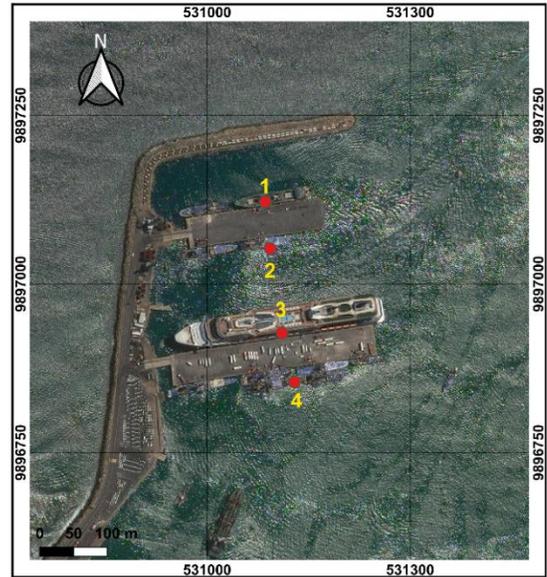


Fig. 9 Ubicación de los puntos de análisis (atracaderos 1, 2, 3, 4) para determinar el Coeficiente de Perturbación dentro de los muelles de la TPM para los distintos escenarios, de acuerdo con Fig.6.

#### A. Escenario: Oleaje ENSO 1997-1998

Como se detalla en la Fig.6, para el escenario ENSO 1997-1998 se consideró una  $H_s = 1.1m$  y  $T_p = 11s$  con direcciones de 330° y 15°. El coeficiente de perturbación es mayor en los exteriores que en el interior del puerto para el ángulo de 330° (Fig. 10a). Por otro lado, para los trenes de ondas que arriban con 15° observamos coeficientes de perturbación altos tanto en el exterior (rompeolas de protección) y dentro del puerto (atracaderos 2, 3 y 4) (Fig. 10b).

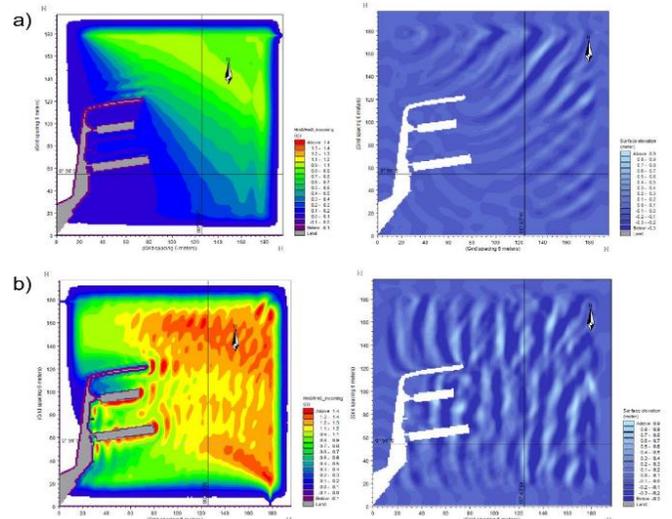


Fig. 10 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde a) 330° y b) 15° (ENSO 1997-1998).

Para el oleaje ENSO 1997-1998, se observan coeficientes de perturbación bajo (<50%) para los ángulos que arriban de los 330°,

sin embargo, para los provenientes de los 15° los coeficientes son altos (>50%) (Tabla VI), los cuales son responsables de alturas mayores a 0.69 m, siendo el atracadero 2 la que tiene mayor altura de 1.46 m.

TABLA VI  
COEFICIENTES DE PERTURBACIÓN DE OLAS (%) EN LOS ATRACADEROS DE TPM PARA EL OLEAJE ENSO1997-1998

Atracaderos	330°	15°
1	7.7	57
2	12	100
3	13	100
4	4.2	100

B. Escenario: Oleaje ENSO 2050 y 2100

Para el escenario 2050 se consideró una  $H_s= 2.08m$  y un  $T_p= 12s$  y para el escenario 2100  $H_s= 2.36m$  y un  $T_p= 13s$ , ambos con direcciones de arribo entre 330° y 15° (Fig. 6). Se observó que tanto para el 2050 y 2100 el ángulo de arribo de 15° es el que mayor perturbación genera dentro de los atracaderos (Figs. 11b y 12b).

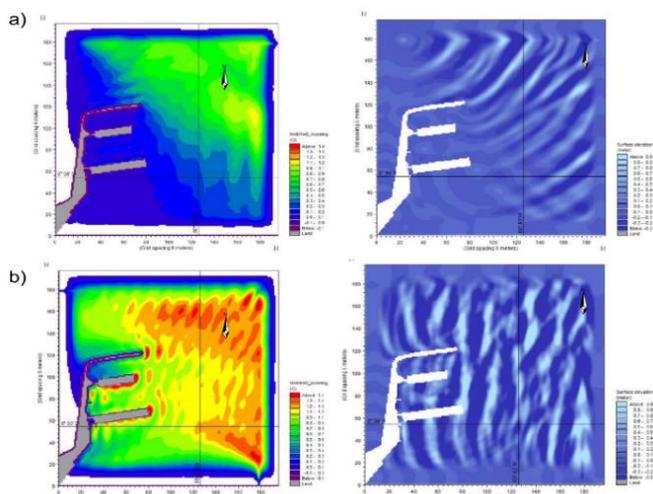


Fig. 11 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde a) 330° y b) 15° (2050).

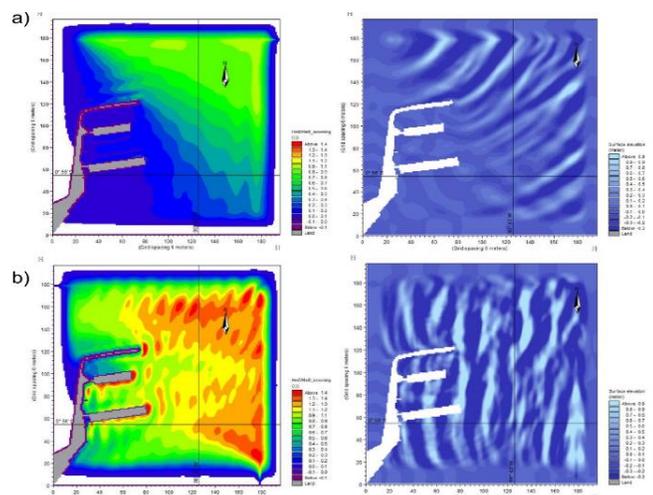


Fig. 12. Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde a) 330° y b) 15° (2100).

Tanto para el 2050 y 2100 los coeficientes de perturbación son altos (>50%) para el oleaje que arriba con 15° presentando alturas máximas de 2.85m (2050) y 3.0m (2100) dentro de la terminal portuaria.

TABLA VII  
COEFICIENTES DE PERTURBACIÓN DE OLAS (%) EN LOS ATRACADEROS DE TPM PARA EL OLEAJE ENSO 2050 Y 2100

Atracaderos	2050		2100	
	330°	15°	330°	15°
1	7.7	57	8.0	57
2	13	100	15	100
3	15	100	16	100
4	4.9	100	5.4	100

C. Escenario: Oleaje ENSO 1997-1998 con modificaciones del Rompeolas Caso 1 y 2.

Los resultados del Caso 1 de protección (alargamiento rompeolas 200m) (Fig. 7a), muestra una disminución considerable del nivel de perturbación dentro de la terminal para el oleaje proveniente de los 330° (Fig. 13a). Por otro lado, los coeficientes de perturbación se mantienen altos dentro de la terminal para el oleaje que arriba con 15° (Fig. 13b).

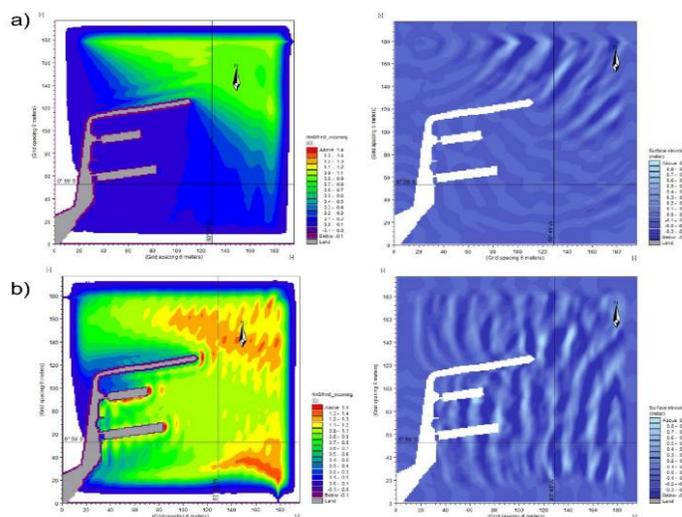


Fig. 13 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde a) 330° y b) 15° (Caso 1: ENSO 1997-1998).

Para el Caso 2 de protección (alargamiento del rompeolas 200m más extensión 100m) (Fig. 7b), se observa una disminución aun mayor del nivel de perturbación para el oleaje de 330° (Fig. 14a). Por otro lado, para el oleaje de los 15° (Fig. 14b) se observan coeficientes de perturbación altos en los muelles.

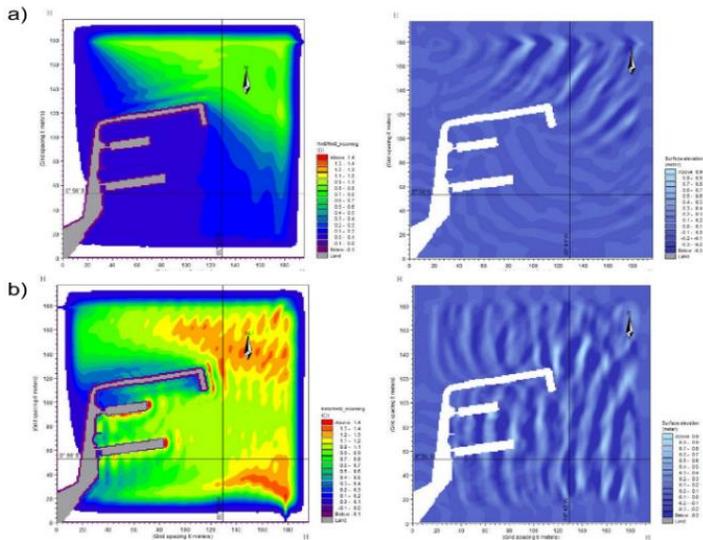


Fig. 14. Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde a) 330° y b) 15° (Caso 2: ENSO 1997-1998)

Tanto para el Caso 1 y 2 de protección, el alargamiento del rompeolas permite que los coeficientes de perturbación en los atracaderos sean menores del 10% para el oleaje proveniente de los 330°. Sin embargo, para el oleaje de los 15° el nivel de agitación aún se mantiene alto en los atracaderos 2 y 4, observándose una disminución en los atracaderos 1 y 3 (Tabla VIII).

TABLA VIII  
COEFICIENTES DE PERTURBACIÓN DE OLAS (%) EN LOS ATRACADEROS DE TPM PARA EL OLEAJE ENSO 1997-1998 CON MODIFICACIONES AL ROMPEOLAS.

Caso 1: Alargamiento 200 m		
Atracadero	330°	15°
1	3	47
2	5	100
3	5	49
4	4	100
Caso 2: Alargamiento 200 m + extensión 100 m		
Atracadero	330°	15°
1	1	43
2	5	100
3	6	56
4	4	100

#### D. Escenario: Oleaje ENSO 2050 y 2100 con modificaciones al Rompeolas Caso 1 y 2.

De acuerdo con los resultados se observa que las perturbaciones producto del oleaje de 330° (Fig. 15a-16a) son mínimas y se presentan en el exterior de la terminal. A diferencia de la dirección de 15° (Fig. 15b-16b) en donde se observa agitación dentro de los muelles. Sin embargo, para ambos casos las modificaciones al rompeolas permiten una reducción del coeficiente de perturbación respecto al estado actual (sin modificación).

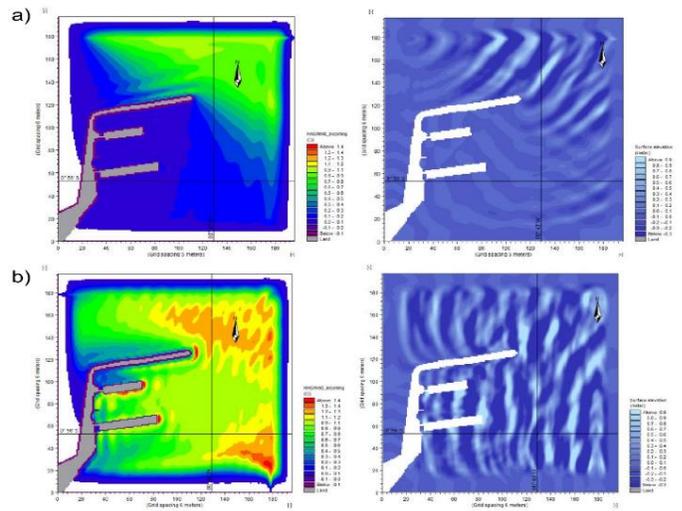


Fig. 15 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde a) 330° y b) 15° (Caso 1: 2050)

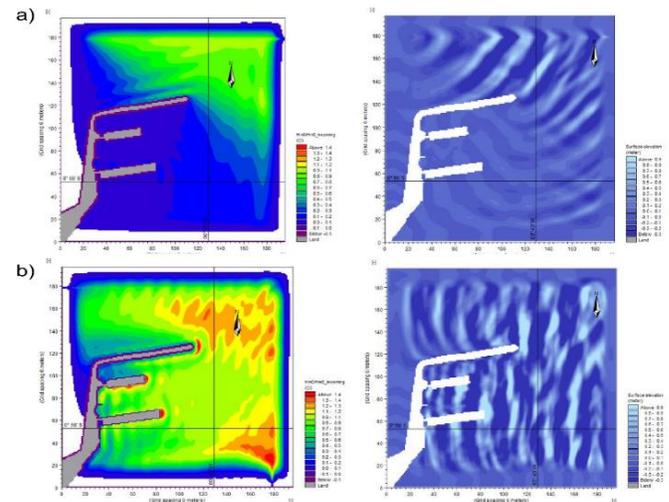


Fig. 16 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación de olas que se acercan desde a) 330° y b) 15° (Caso 1: 2100)

Un comportamiento muy similar se observa para el Caso 2 de protección, en el cual se reduce considerablemente los coeficientes de perturbación de los frentes de ondas que ingresan de los 330° (Fig. 17a-18a) y no así de los 15° (Fig. 17b-18b), a pesar de tener una extensión adicional de 100 m.

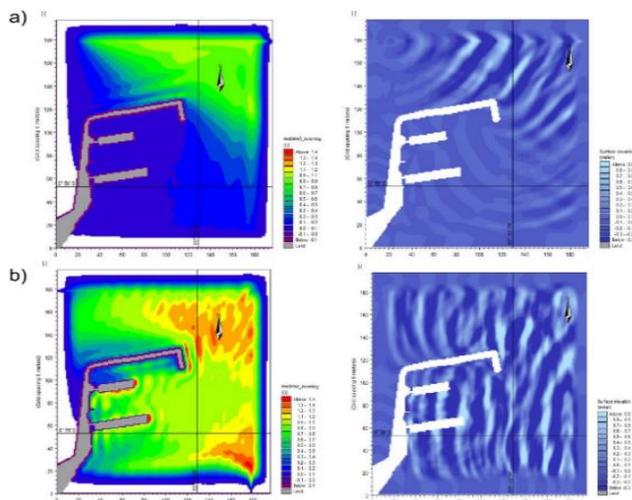


Fig. 17 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde a) 330° y b) 15° (Caso 2: 2050).

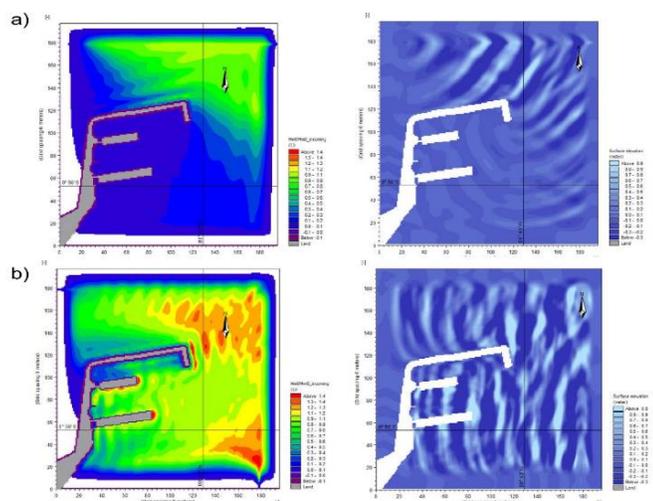


Fig. 18 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde a) 330° y b) 15° (Caso 2: 2100).

TABLA IX  
COEFICIENTES DE PERTURBACIÓN DE OLAS (%) EN LOS ATRACADEROS DE TPM PARA EL OLAJE ENSO 2050 Y 2100 CON MODIFICACIONES AL ROMPEOLAS

Caso 1: Alargamiento 200 m				
Atracaderos	2050		2100	
	330°	15°	330°	15°
1	3	44	4	51
2	6	100	7	100
3	6	57	9	53
4	3	94	4	90
Caso 2: Alargamiento 200 m + extensión 100 m				
Atracadero	2050		2100	
	330°	15°	330°	15°
1	3	44	4	51
2	6	100	7	100
3	6	57	9	53
4	3	94	4	90

Los Casos 1 y 2 de protección (rompeolas), permiten analizar que los coeficientes de perturbación en los atracaderos son menores del 10% para el oleaje proveniente de los 330°. Sin embargo, para el oleaje de los 15° el nivel de agitación aún se mantiene alto (>50%) en los atracaderos 2 y 4, solo observándose una disminución en los atracaderos 1 y 3 (Tabla VIII).

#### IV. CONCLUSIONES

La utilización de modelos numéricos computacionales nos permite recrear eventos extremos que han ocurrido y evaluar posibles escenarios en un mediano y largo plazo e incluir modificaciones a los diseños actuales de ingeniería (protección) [19], para de esta forma evaluar el nivel de perturbación que se alcanza dentro de la terminal. Además, desde un punto de vista ingenieril nos permite explorar diferentes modificaciones en la estructura para analizar el comportamiento del sistema y seleccionar la estructura óptima que mejore las operaciones de las embarcaciones ante eventos extremos.

Para el caso del presente estudio se utilizaron los módulos SW y BW de MIKE para evaluar la transformación del oleaje desde aguas profundas hasta aguas someras y la agitación de olas dentro de la Terminal Portuaria de Manta (TPM). Los resultados obtenidos con el módulo SW muestran que, los ángulos que inciden sobre el rompeolas corresponden al 67% de ocurrencia al rango de 300°-330° y del 2% de ocurrencia se dan en el rango de 1°-30°, siendo este último rango el que mayor agitación causa dentro del puerto.

Por consiguiente, los resultados obtenidos con el módulo BW demuestran que para el evento ENSO 1997-1998 (sin modificar rompeolas) los niveles máximos de agitación del oleaje con ángulos de 15° presentan alturas significativas que sobrepasan los 0.5 m en los atracaderos, siendo este valor, la altura máxima con la que se puede realizar la operación de carga a los diferentes buques que la TPM recibe. Se puede observar también que estos niveles de perturbación serán mayores hacia los años 2050 y 2100 generando mayores problemas dentro de la terminal portuaria, siempre y cuando no se consideren modificaciones adicionales al rompeolas que mitigue estos impactos. Las modificaciones al rompeolas que protege a los muelles de la TPM muestran que permiten reducir en un 14% los niveles de agitación dentro de los atracaderos respecto al oleaje de 15°, aunque, aun se pueden observar niveles altos de agitación en los atracaderos 2 y 4 que no permitirían un eficiente desarrollo de operaciones de carga y descarga de mercaderías frente a estos eventos extremos.

De manera general este trabajo evidencia la necesidad de evaluar los posibles impactos que la TPM enfrentará en los próximos años debido a los efectos de cambio climático, oleajes extremos, elevación del nivel medio del mar y como esto afectará su infraestructura portuaria, operaciones, logísticas (transporte marítimo) traduciéndose en pérdidas económicas. Adicionalmente, del presente estudio se observa que una alternativa viable para enfrentar esta situación en el mediano plazo sería el Caso 1 de protección, puesto que, a simple vista esta modificación al rompeolas no compromete las actividades de maniobra de ingreso a los muelles internacionales. Sin embargo, esta solución de ingeniería debe considerar otros aspectos como el estudio de la morfodinámica (transporte de sedimento) y cómo afectaría la

batimetría (dragados, mantenimiento de las rutas de acceso a los puertos, entre otros).

También es importante considerar que obtener registros continuos de oleaje en la costa ecuatoriana resulta difícil debido a que no siempre se cuenta con equipos de medición instalados (olígrafos) por largos periodos de tiempo, por ello, en muchos casos se obtienen estos datos de sitios webs como WAVEWATCH (NOAA) o ECMWF/CMEMS (ESA) y se los compara con estudios que se han realizado (bibliografía). Sin duda, esto representa una desventaja ya que para los procesos de calibración y validación es importante realizar análisis estadísticos con un mayor volumen de datos a fin de establecer una mejor correlación de los resultados y poder ofrecer información con un grado de confiabilidad aceptable para los diseños de ingeniería a los tomadores de decisiones.

Con lo expuesto, el estudio con modelaje numérico, realizado en la TPM de Ecuador, puede constituir una referencia nacional, regional o global para el desarrollo de infraestructura portuaria. Más cuando la mayor parte de las terminales portuarias en el mundo enfrentan un gran desafío relacionado al cambio climático y como esto va a afectar (incrementar) el nivel medio del mar y también los eventos extremos de oleajes [19], generando pérdidas económicas alrededor de 27 billones de dólares al año a nivel mundial hacia el año 2100 [1] [21] [22] [23].

Para hacer frente a este problema, se va a requerir evaluar las actuales condiciones de protección y para tomar acciones de adaptación y resiliencia a fin de mitigar estos impactos [20] [21] [22] [23]. Sin duda, las estrategias de adaptación o posibles soluciones van a depender en gran medida de la información que posean los tomadores de decisiones.

#### AGRADECIMIENTOS

A la Terminal Portuaria de Manta (TPM) por brindar su apoyo para desarrollar este proyecto, en la cual se proporcionó información importante que permitió identificar el problema, evaluar eventos que han sucedido y a partir del uso de modelos computacionales analizar posibles escenarios que puedan ayudar en la toma de decisiones desde el punto de vista de ingeniería.

#### REFERENCIAS

[1] Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Comercio y Desarrollo, «Adaptación del cambio climático de los puertos marítimos en apoyo de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible», Naciones Unidas, Ginebra, 2020.

[2] T. Notteboom, T. Pallis y J. P. Rodrigue, «Disruptions and resilience in global container shipping and ports: the COVID-19 pandemic versus the 2008-2009 financial crisis», *Maritime Economics & Logistics*, vol. 2, n° 23, pp. 1-32, 2021.

[3] T. Sawaragi, Coastal Engineering-Waves, Beaches, Wave-Structure Interactions, Osaka: Elsevier, 1995.

[4] Consulsua, «Estudio de Impacto Ambiental para la Construcción y Operación de la Terminal Internacional del Puerto de Manta Fase 1A-1B», Consulsua, Manta, 2017.

[5] J. Panigrahi, C. Padhy y A. Murty, «Inner Harbour wave agitation using boussinesq wave model», *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, n° 7, pp. 70-86, 2015.

[6] MTOP & APM, «Reporte de evaluación de impacto ambiental y social para la reconstrucción y ampliación de la Terminal Portuaria de Manta», Manta, 2018.

[7] APM, «Boletín Estadístico Portuario», Autoridad Portuaria de Manta, Manta, 2020.

[8] B. Soledispa, «Estudio de las características sedimentológicas de la zona costera frente al balneario de Manta, Ecuador», *Acta Oceanográfica del Pacífico*, Guayaquil, 2009.

[9] S. Cartaya, S. Zurita y V. Montalvo Párraga, «Métodos de ajuste y homogenización de datos climáticos para determinar el índice de humedad de Lang en la provincia de Manabí, Ecuador», *Revista de Agrociencias*, Manta.

[10] NOAA, «Temperaturas de la superficie del mar del Pacífico Ecuatorial», National Centers for Environmental Information, [En línea]. Available: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/sst>. [Último acceso: 21 12 2021].

[11] M. Cruz P, «Determinación de los períodos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña), en base al comportamiento mensual de los Pterópodos y Heterópodos, como Bioindicadores del ecosistema marino Ecuatoriano», *Acta Oceanográfica del Pacífico*, vol. 13, n° 1, p. 21, 2005-2006.

[12] L. Vera, «Régimen de oleaje en la zona de Jaramijó y Salinas», *Acta Oceanográfica del Pacífico*, pp. 29-35, 2000.

[13] CH2MHILL, «Proyecto de Expansión del Puerto de Manta- Estudio de Modelaje de Olas», Terminales Internacionales de Ecuador S.A., Manta, 2007.

[14] «El fenómeno El Niño 1997-1998 en el Ecuador», de *Impacto del Fenómeno del Niño en Infraestructura de Agua Potable-Lecciones Aprendidas en Ecuador*, Guayaquil, Corporación Andina de Fomento, 2000, p. 31.

[15] M. Lucero y M. D. P. Cornejo, «Evidencia de la Corriente de Cromwell entre 92°W y 84°W, observada en periodos normales y durante El Niño 82-83», *Acta Oceanográfica del Pacífico*, vol. 6, n° 1, p. 10, 1990.

[16] M. Contreras López, J. Cevallos Zambrano, T. Erazo Cedeño, M. Alday González y C. E. Mizobe, «Cambio y variabilidad climática contemporáneos en la costa de Manabí, Ecuador», *La Técnica*, Ecuador, 2014.

[17] Coastal Engineering Research Center, Shore Protection Manual, Vicksburg, Mississippi: U.S. Government Printing Office, 1984.

[18] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2021. The Physical Science Basis*, 2021.

[19] I. Saltos Andrade, G. Andrade Bowen, B. Maquilón Muñoz, C. Martillo Bustamante, G. Andrade García, J. Cedeño Oviedo y E. Cervantes Bernabe, «Evaluación de Alternativas de Protección Costera Clásicas y de Ingeniería Verde, utilizando Modelos Numéricos. Caso de Estudio: San Pedro, Ecuador», *LACCEI*, 2020.

[20] A. Becker, Ng, McEvoy y Mullet, «Implications of climate change for shipping: ports and supply chains.», *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change* 9, e508, 2018.

[21] A. Becker, Inoue, Fischer y Schwegler, «Climate change impacts on international seaports: knowledge, perceptions, and planning efforts among port administrators.», *Climatic Change* 110(1-2): 5-29., 2012.

[22] F. Mateos Lenón, A. Sartal, López-Manuel y M. Quintás, «Adapting our sea ports to the challenges of climate change: Development and validation of a Port Resilience Index.», *Marine Policy*, 2021.

[23] C. Izaguirre, I. J. Losada, P. Camus, J. L. Vigh y V. Stenek, «Climate change risk to global port operations.», *Nature Climate change*, n° 11, pp. 14-20, 2020.