

Clima marítimo y modelos numéricos de aplicación a los estudios portuarios

M.^o JESUS MARTIN SOLDEVILLA (*)
JOSE RAMON IRIBARREN ALONSO (**)

RESUMEN. El desarrollo que el campo numérico y computacional ha experimentado en las últimas décadas hace posible abordar hoy día, con el modelo adecuado, la práctica totalidad de los problemas portuarios.

De esta forma es posible conocer las variaciones que experimenta el oleaje en su propagación hasta la costa así como predecir y/o analizar los problemas que originan el oleaje (agitación), las mareas (corrientes) y las ondas largas (resonancia).

Además se pueden determinar a priori qué tipo de maniobra tendrán que efectuar los distintos tipos de buques para acceder y atracar en el interior de una instalación portuaria (maniobrabilidad).

Otros procesos que actualmente son sometidos a simulación numérica en el CEPYC son los relativos al transporte litoral y cambio en la línea de playa así como los problemas referentes a la contaminación marina.

MARITIME CLIMATE AND NUMERICAL MODELS APPLIED TO HARBOUR STUDIES

ABSTRACT. *Developments in the computational and numerical fields have made such breakthroughs in the last few decades that, with a suitable model, it is now possible to solve virtually all the problems that arise in ports and harbours.*

These methods make it possible to know the variations that take place in wave propagation to the coast as well as permitting the prediction of and/or analysis of the problems arising from waves (agitation), tides (currents) and long waves (resonance).

Furthermore, it is possible to aprioristically determine what type of manoeuvre has to be made by different kinds of vessels, when they have to enter a port or dock (manoeuvrability).

Other processes which are currently being subjected to numerical simulation at the CEPYC (Coasts and Harbours Research Centre) include those concerning littoral transport and change of shoreline, as well as problems related to coastal contamination.

1. INTRODUCCION

Cuando se desea diseñar una nueva instalación portuaria o se necesita evaluar la operatividad de una remodelación o ampliación en el interior de una existente es preciso tipificar las distintas variables oceanográficas que influyen en cada caso particular.

Mientras que para el diseño basta con establecer las características extremas del oleaje en la zona de pro-

yecto, por ser éste el fenómeno que determina la estabilidad de las distintas estructuras, de cara a la explotación habrá que considerar, además de la agitación interior que origina el oleaje, todos aquellos fenómenos que, dependiendo de la localización geográfica de la nueva instalación, puedan afectar a su rendimiento futuro.

Esto obliga a que, en determinados casos, deban analizarse también las mareas y las ondas largas por la repercusión que las nuevas acciones puedan presentar en el esquema general de circulación de corrientes o por la posible aparición de fenómenos resonantes, respectivamente.

Finalmente también habrá que considerar el grado de dificultad de las maniobras de acceso y atraque de los distintos tipos de buques para los que haya sido diseñado ya que de nada servirá proyectar un puerto que

(*) Dra. en Ciencias Químicas. Jefe del Sector de Estudios Portuarios del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX IMOPTI.

(**) Ingeniero Naval. Director de Programa de Experimentación Portuaria del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX IMOPTI.

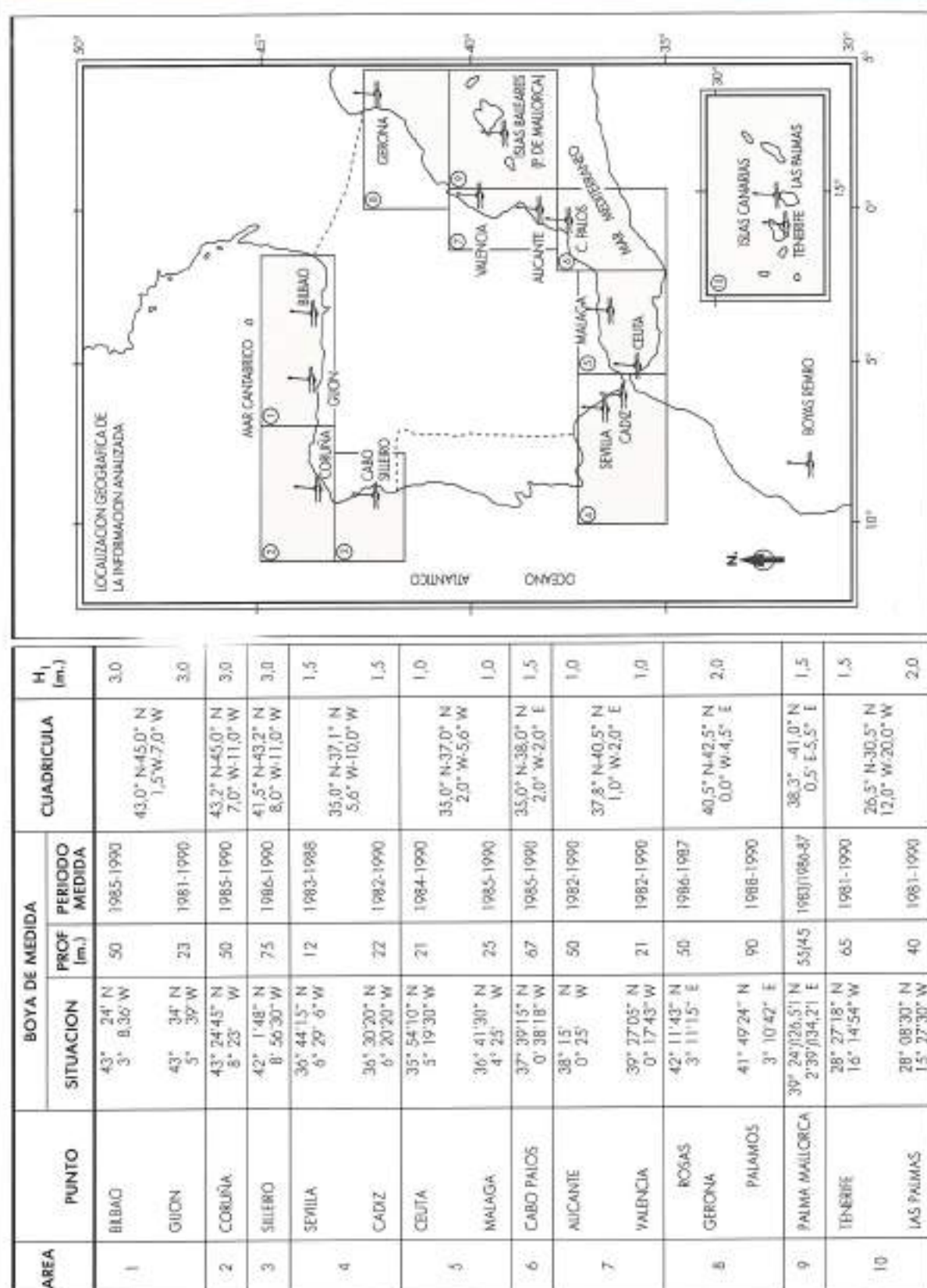


FIGURA 1a. Localización y características de la información analizada.

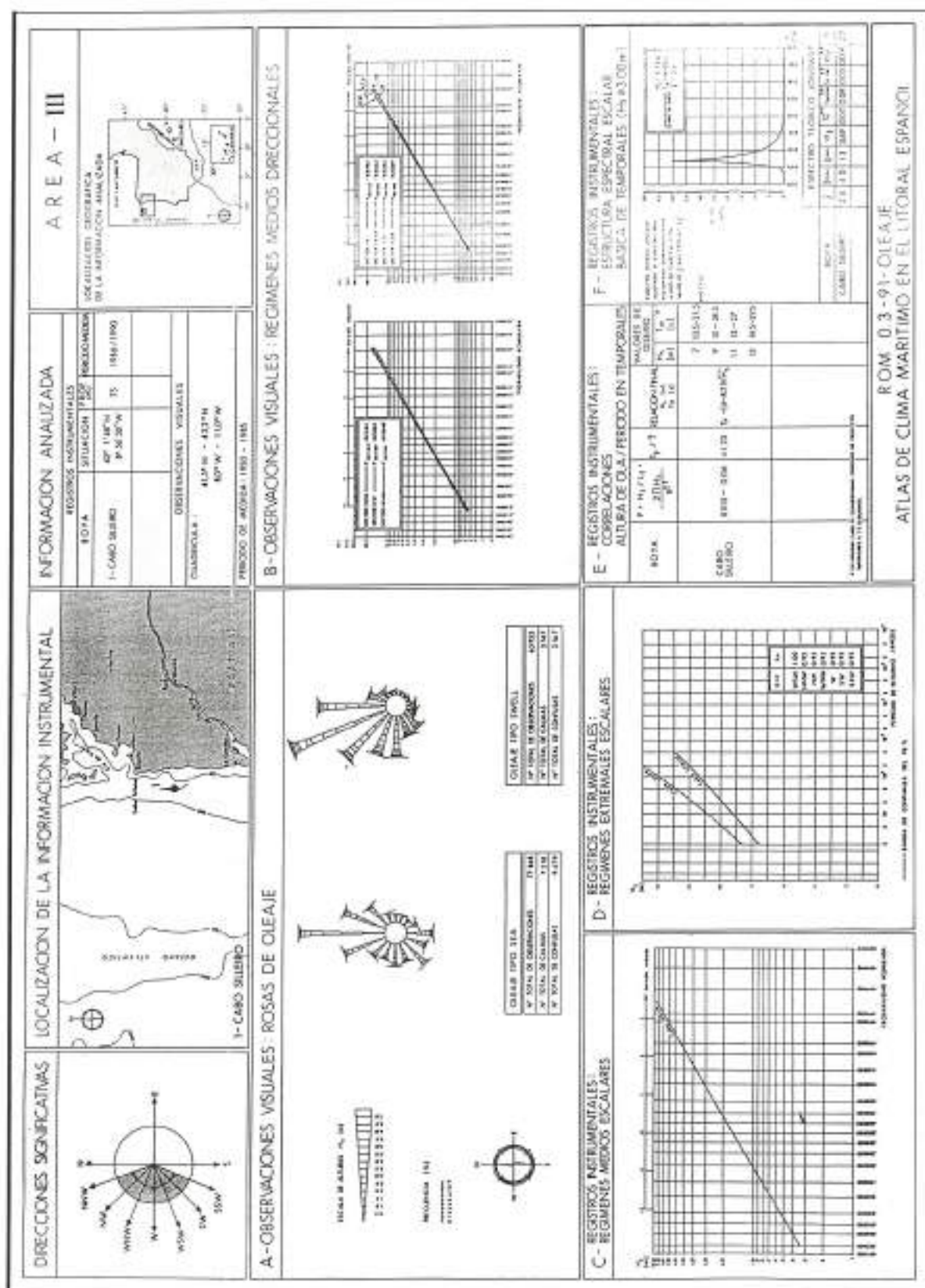


FIGURE 1b.

presente unas condiciones óptimas de explotación si el acceso a los muelles presenta serias dificultades.

2. CLIMA MARITIMO

El factor fundamental tanto en el diseño, entendido éste como la tipificación estructural de los distintos elementos, como en la explotación de un puerto, es el oleaje. Esto determina que para abordar cualquier estudio portuario haya que efectuar un estudio previo de clima marítimo en el que se establezcan las características extremas del oleaje o, en su caso, se definan las condiciones del oleaje medio.

El tratamiento que se aplica al fenómeno de interés, oleaje, en ambos casos es radicalmente distinto. Así, mientras que en el diseño interesa definir los parámetros del oleaje extremal —básicamente representados por su altura (H), período (T), dirección (θ) y forma espectral (γ)— que la futura estructura deberá soportar durante la vida útil de proyecto, en los estudios encaminados a evaluar la operatividad, o tiempo útil de trabajo de las distintas instalaciones lo que interesa es establecer las características medias (H, T, θ) de los distintos oleajes que contribuyen a la agitación interior del puerto.

Para establecer adecuadamente esta caracterización sería preciso disponer de registros procedentes de boyas direccionales de medida de oleaje. Sin embargo, la disponibilidad actual de esta información es todavía muy escasa.

Otra fuente alternativa la constituyen las boyas escalares de las que la Red Española de Medida y Registro de Oleaje (REMRO) (figura 1) posee un amplio número emplazadas a lo largo de todo el litoral insular y peninsular español.

El inconveniente fundamental de estos datos es su carácter escalar, siendo la dirección un factor fundamental en cualquier estudio portuario.

Afortunadamente se dispone de una base de datos visuales cubriendo también todo el litoral español. Esta fuente de medida, aunque de peor calidad que la instrumental, sí contiene información de la dirección.

El análisis conjunto de estas fuentes de medida, agrupadas previamente en 10 áreas climáticas diferentes, ha permitido elaborar un Atlas de Clima Marítimo en el que aparecen tipificados los parámetros más representativos del oleaje para todo el litoral español.

La información que dicho Atlas incluye son (figura 1b): posición de la/s boya/s analizadas, direcciones de interés, regímenes medios escalares y direccionales, regímenes extremos y estructura espectral escalar básica necesaria para reproducir los oleajes de ensayo.

Además, como las boyas utilizadas se encuentran fondeadas en profundidades reducidas o intermedias en el atlas se incluyen los coeficientes de refracción y shoaling necesarios para transferir la estima a mar profunda. De esta forma basta con localizar la información de interés y aproximarla hasta la zona de proyecto que, generalmente, estará emplazado en profundidades reducidas o intermedias.

3. ESTUDIOS PORTUARIOS

Las dos herramientas fundamentales de que dispone el técnico portuario para abordar sus estudios son:

- Modelos físicos.
- Modelos matemáticos.

Los modelos físicos son modelos a escala que permiten reproducir de forma bastante fidedigna las condiciones de ensayo. Presentan el inconveniente de su elevado costo y de requerir bastante tiempo para dar una respuesta.

La otra herramienta alternativa, los modelos numéricos, también reproducen bastante fielmente la práctica totalidad de los fenómenos de interés portuario dando respuestas muy rápidas y con un costo muy inferior al correspondiente modelo físico. Sin embargo, es evidente que determinados fenómenos son mejor reproducidos en los modelos reducidos por lo que ambos, físico y numérico, deben considerarse herramientas de trabajo complementarias. Además existen ciertos procesos que todavía hoy no pueden reproducirse mediante simulación matemática.

En cualquier caso, una vez caracterizado el oleaje en alta mar, bien medio o extremal, lo primero es aproximarlos hasta la zona de estudio. Esta aproximación tendrá que realizarse con un modelo matemático ya que el modelo físico presenta limitaciones de espacio.

Conocido el oleaje en el punto de interés, la herramienta de trabajo dependerá del tipo de estudio (figura 2).

Así, si quiere determinar la estabilidad de una estructura (diseño) o se quiere analizar el movimiento de los buques atracados frente a unas condiciones de ensayo dadas, nos veremos obligados a recurrir a la simulación a escala.

Cualquier otro proceso, agitación, resonancia, corrientes y maniobrabilidad, podrá ser acometido con cualquiera de los dos tipos de modelos si bien, para economizar gastos, es preferible ensayar varias alternativas con el modelo matemático y definida la alternativa o situación, en principio, definitiva, contrastar los resultados, si la envergadura del proyecto así lo requiere, con una simulación a escala.

3.1. MODELOS NUMERICOS DE PROPAGACION DE ONDAS CORTAS. OLEAJE ($2s \leq T \leq 30s$)

Los procesos que intervienen en la propagación del oleaje, despreciando el decay y la rotura, son los conocidos fenómenos de refracción y shoaling, por lo que debido al efecto del fondo marino, el oleaje altera tanto su altura como, en el caso de la refracción, la dirección de propagación.

Si en el área de propagación aparece algún obstáculo el oleaje experimenta el proceso de la difracción pivotando en el borde del obstáculo, alterándose de nuevo su dirección y altura.

Finalmente, cuando el oleaje alcanza una zona portuaria, además de los procesos mencionados, hay que considerar las reflexiones que experimenta con las es-

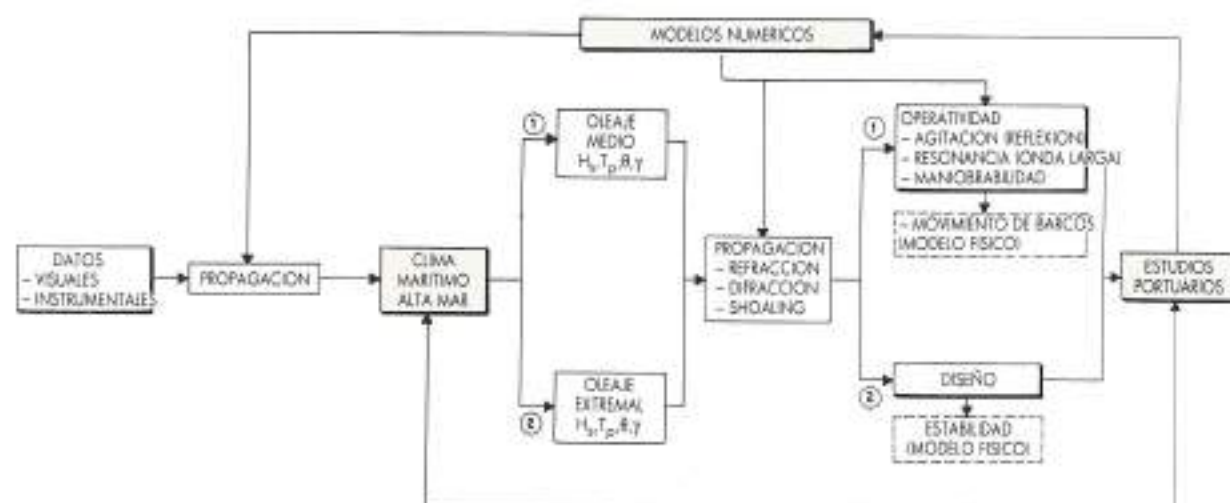


FIGURA 2.

estructuras aumentando, en consecuencia, la agitación interior.

Actualmente en el CEPYC estos procesos son analizados con distintos tipos de modelos matemáticos, dependiendo del tipo de ensayo.

a) Modelo de propagación en áreas extensas. Cuando el oleaje se propaga en zonas no limitadas los fenómenos que dominan son los producidos por el fondo, básicamente refracción y shoaling, pudiéndose también considerar, dependiendo de los casos, la difracción con el propio fondo.

El modelo más simplificado de propagación es el que, basado en el método de las ortogonales, y planteado en el sistema de coordenadas rayo-frente de onda, reproduce exclusivamente la refracción y el shoaling (figura 3A).

Evidentemente estos modelos dejan de tener utilidad cuando por las características del área de propagación haya que considerar también el fenómeno de la difracción que produce la presencia de distintos obstáculos (cabos, islas...).

Este último proceso puede ser implementado con muy bajos requerimientos computacionales y bastante buena aproximación, con modelos basados en la ecuación del potencial de Bernoulli y transformados en modelos parabólicos, en el sentido matemático, mediante diversas aproximaciones dadas por Boij, Kirby o Radder.

Los resultados básicos que ofrecen estos modelos son la dirección de avance y el coeficiente de variación —refracción/shoaling, en el primer caso, y, además, el de difracción, en estos últimos—, del frente propagado en toda la zona simulada. En las figuras 3A (rayos y coeficiente de refracción/shoaling) y 3B (avance del frente y coeficiente de difracción/refracción/shoaling), se recogen las salidas gráficas más características.

b) Modelos de propagación en áreas confinadas. Cuando el oleaje penetra en un área portuaria, además de los

procesos descritos experimenta un nuevo fenómeno, la reflexión con las distintas estructuras, produciéndose un aumento de la agitación interior.

Para unas condiciones de oleaje fijas, H_p , T_p , R y la misma configuración de la dársena, el grado de reflexión es función del tipo de estructura.

Así, dependiendo de la «porosidad» del elemento se producirá una reflexión total (dique vertical), parcial (muelle en escollera, claraboya...) o, prácticamente nula (zona de playa muy tendida).

Aunque estos procesos venían analizándose exclusivamente en modelo físico, el desarrollo experimentado en el campo numérico y computacional hace posible tratarlos con modelos matemáticos con suficiente aproximación, con la ventaja adicional, anteriormente señalada, de que los tiempos de respuesta y los costos del estudio resultan muy inferiores al correspondiente ensayo en modelo reducido.

Entre los pocos modelos numéricos capaces de simular todos estos procesos, el pionero y más contrastado es el MIKE21 desarrollado en el Danish Hydraulic Institute (Dinamarca).

El MIKE21 es un modelo hiperbólico de simulación de flujos que introduce el concepto de porosidad para simular los distintos grados de reflexión; utilizándose los términos de Boussinesq en el caso de ondas cortas para corregir la distribución de presión no hidrostática debido a las aceleraciones verticales. La discretización numérica de las ecuaciones que rigen todo el proceso se lleva a cabo mediante el método de diferencias finitas.

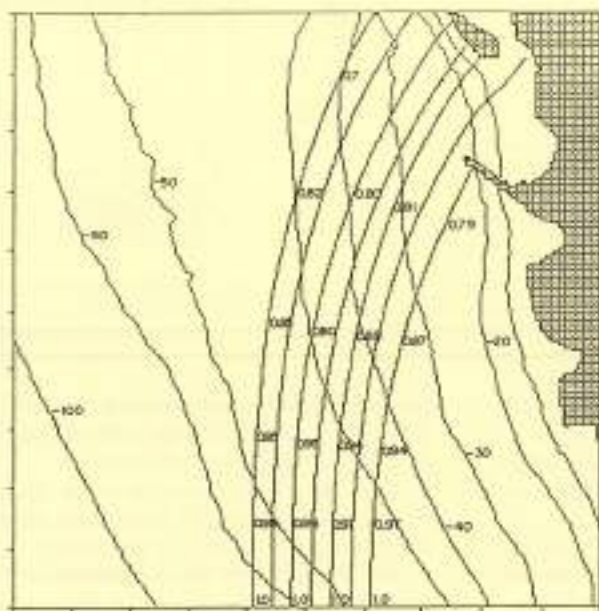
Entre las distintas salidas que el modelo ofrece, la de mayor interés es, por el grado de información que arroja, la distribución zonal de agitación, definida esta última como el cociente entre la altura de ola en cada punto de la malla simulada y la altura generada a la entrada del modelo.

Un ejemplo de estos resultados se recoge en las figu-

METODO DE LAS ORTOGONALES
REFRACCION(SHOMING)

RAYTR

ARREOTE, DIR.: ENE, $T = 13$ seg

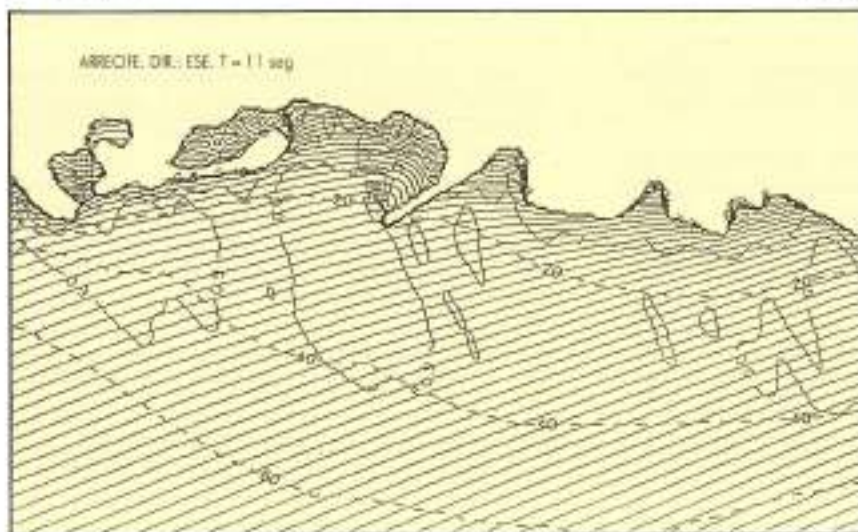


A.

MODELO PARABOLICO
REFRACCION(SHOMING)(DIFRACCION)

REFDIF101

ARREOTE, DIR.: ESE, $T = 11$ seg



B.

FIGURA 3. Modelos de propagación.

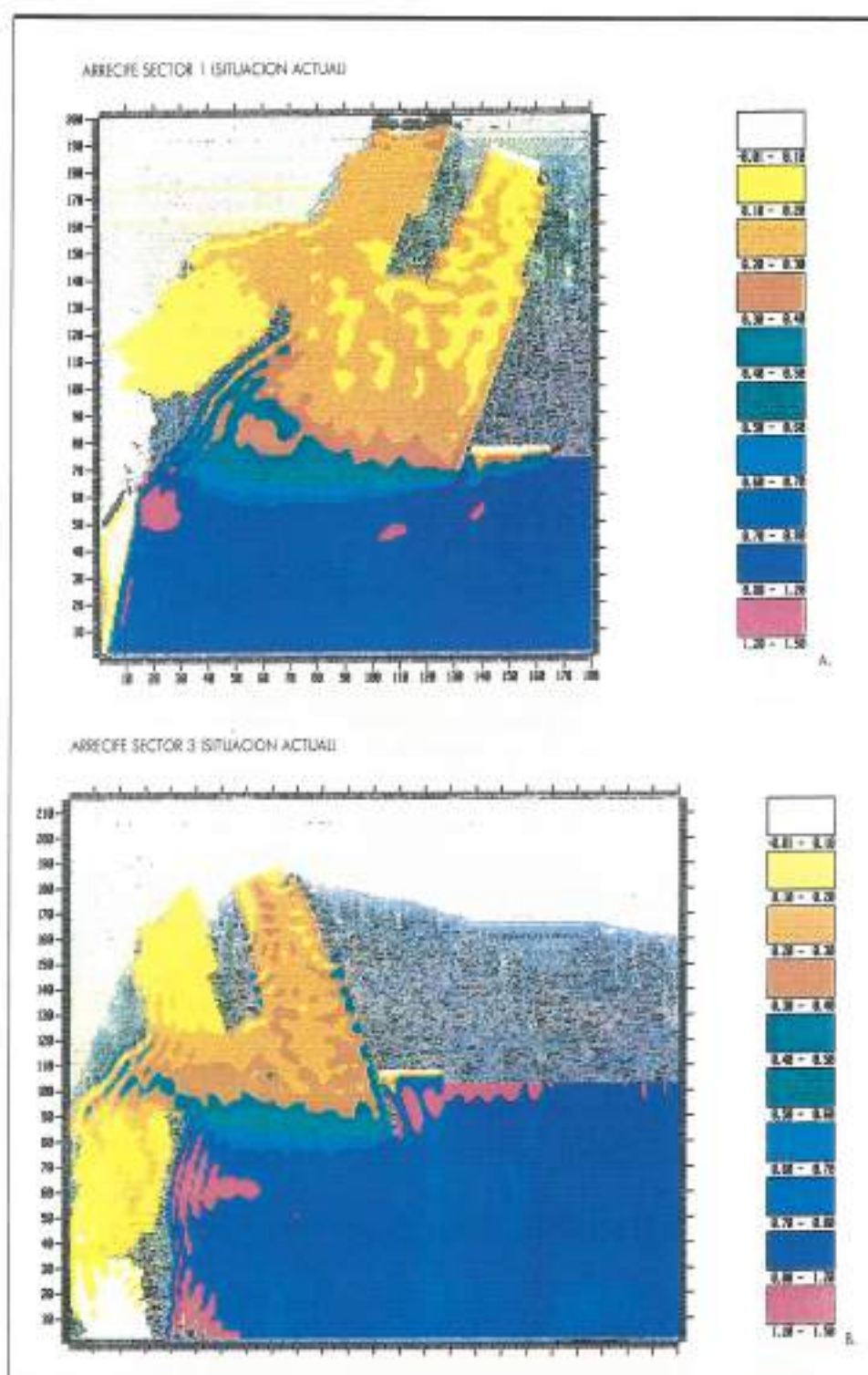


FIGURA 4. Modelo de Agitación MKE21.

ras 4A y 4B, donde fácilmente se aprecian las zonas donde se localizan las mayores energías.

La inspección visual de los gráficos, el análisis de las

condiciones de entrada (H , θ) y la cuantificación analítica de los resultados obtenidos teniendo en cuenta las características climáticas de la zona (régimen medio di-

reccional) permiten, en su caso, plantear las modificaciones pertinentes.

3.2. MODELOS NUMERICOS DE PROPAGACION DE ONDAS LARGAS ($30S < T < MINUTOS$)

Mientras que el origen del oleaje está bien determinado: el viento, las causas que originan las ondas largas no son, en la actualidad, totalmente conocidas, existiendo teorías basadas en la interacción del oleaje y otras que se apoyan en las posibles oscilaciones de presión atmosférica.

Los inconvenientes más serios que provocan las ondas largas no suelen ser por la amplificación de movimientos verticales, aunque a veces afecte a cargas y descargas, sino por la de movimientos horizontales, en algunos órdenes de magnitud superiores a los anteriores que además de producir retrasos en la actividad portuaria, pueden provocar accidentes debido a rotura de amarres de buques atracados y colisiones de embarcaciones entre sí y contra estructuras.

El fenómeno de resonancia se producirá cuando la respuesta del sistema, sometido a una excitación exterior, presente una amplificación máxima. El problema depende de la geometría del recinto y de las características de la excitación, mientras que la magnitud está definida por los mecanismos de disipación de energía que se presentan en el fenómeno.

Puesto que el análisis de estos procesos con modelos numéricos basados en las ecuaciones no lineales de ondas largas suponen un elevado costo, el estudio de estos fenómenos en el CEPYC se realiza con un modelo elíptico basado en la ecuación del potencial de velocidades, suponiendo modificaciones graduales de profundidad y resolviendo la ecuación variacional que rige el proceso mediante el método de elementos finitos.

La respuesta del sistema se analiza a través de las isóneas de amplificación (figura 5a) y velocidades (figura 5b), detectándose las zonas donde se localizan las máximas amplificaciones.

Si el problema (acoplamiento) se presenta la solución al mismo es compleja ya que, en general, sólo suele resultar efectivo variar la geometría total del recinto.

Además, al no existir en la actualidad registros de estos fenómenos, y en consecuencia, ensayar un amplio pero limitado barrido de períodos, se pueden adoptar medidas válidas para la frecuencia ensayada que resulten inaceptables en otro rango de períodos no considerados y que pueden coincidir con el período que está provocando el problema.

En definitiva, para analizar eficaz y razonablemente estos estudios sería conveniente disponer de algún tipo de medida, aunque fuera la simple apreciación visual, en todos aquellos puntos donde se haya detectado este tipo de problemas.

3.3. MODELOS NUMERICOS DE MANIOBRABILIDAD DE BUQUES

Como se indicó, otro factor fundamental para que un

puerto resulte operativo es el grado de dificultad de las distintas maniobras que los buques tienen que realizar para poder operar en él.

Evidentemente, el estudio de la maniobrabilidad de un buque requiere no sólo conocer el medio físico marino, sino también disponer de un alto grado de experiencia dado el gran número de variables oceanográficas —básicamente viento, corrientes, oleaje— del propio buque —forma del buque, tipo y clase de timón y hélice...— y otros factores —remolcadores fundamentalmente— que intervienen en el proceso.

Para analizar estos problemas existen actualmente simuladores con autopiloto y simuladores de buques en tiempo real.

Mientras que los primeros actúan sobre el timón intentando seguir la trayectoria fijada para unas condiciones ambientales y posición inicial dadas, los simuladores en tiempo real siguen exactamente la trayectoria que resulta de las órdenes indicadas.

Actualmente el CEPYC tiene operativo un simulador con autopiloto, modelo SHIPMA, desarrollado por Delft Hydraulics (Holanda) que permite representar el comportamiento durante la maniobra de un buque sometido a la acción del viento, el oleaje y la corriente, auxiliado por remolcadores.

Su aplicación se encuentra en el diseño de puertos y el estudio de canales interiores, con el objetivo de proporcionar al proyectista una orientación sobre las posibilidades y restricciones del buque en relación con la infraestructura y condiciones ambientales.

El modelo matemático calcula la trayectoria del centro de gravedad del buque, la evolución del rumbo y las acciones del timón, la máquina y los remolcadores con un método incremental en el tiempo. En este proceso toma en consideración la influencia del viento, el oleaje, la corriente y la profundidad.

SHIPMA resuelve las ecuaciones de movimiento del buque, del tipo de Abkowitz ($F = m \cdot a$ en unos ejes solidarios con el buque), mediante desarrollos de Taylor con términos hasta de tercer orden, considerando únicamente los movimientos en el plano (avance, deriva y guiñada).

Como fuerzas de excitación se consideran:

- La acción del timón y la hélice.
- La fuerza debida al viento.
- La fuerza debida a la corriente.
- La fuerza debida al oleaje.
- El tiro de los remolcadores.

Entre las distintas salidas que el modelo ofrece destacan el gráfico bidimensional de la trayectoria del buque (figura 6) que permite considerar el grado de dificultad de la misma.

4. CONCLUSIONES

Es evidente que la calidad de cualquier estudio relacionado con la actividad portuaria, costera y de todas aquellas ligadas con los procesos marítimos es función

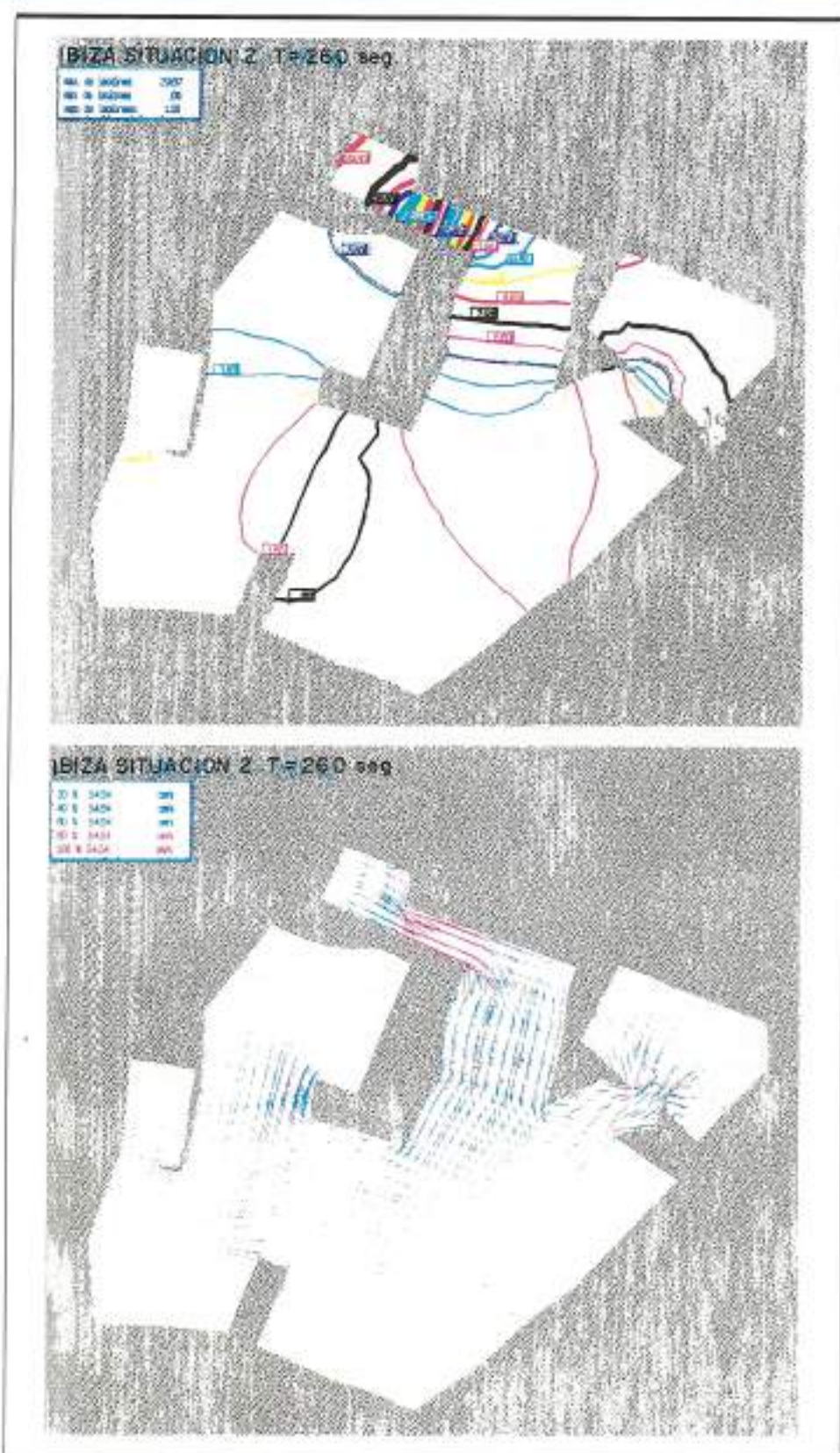


FIGURA 5. Modelo de Ondas Largas WAVES.

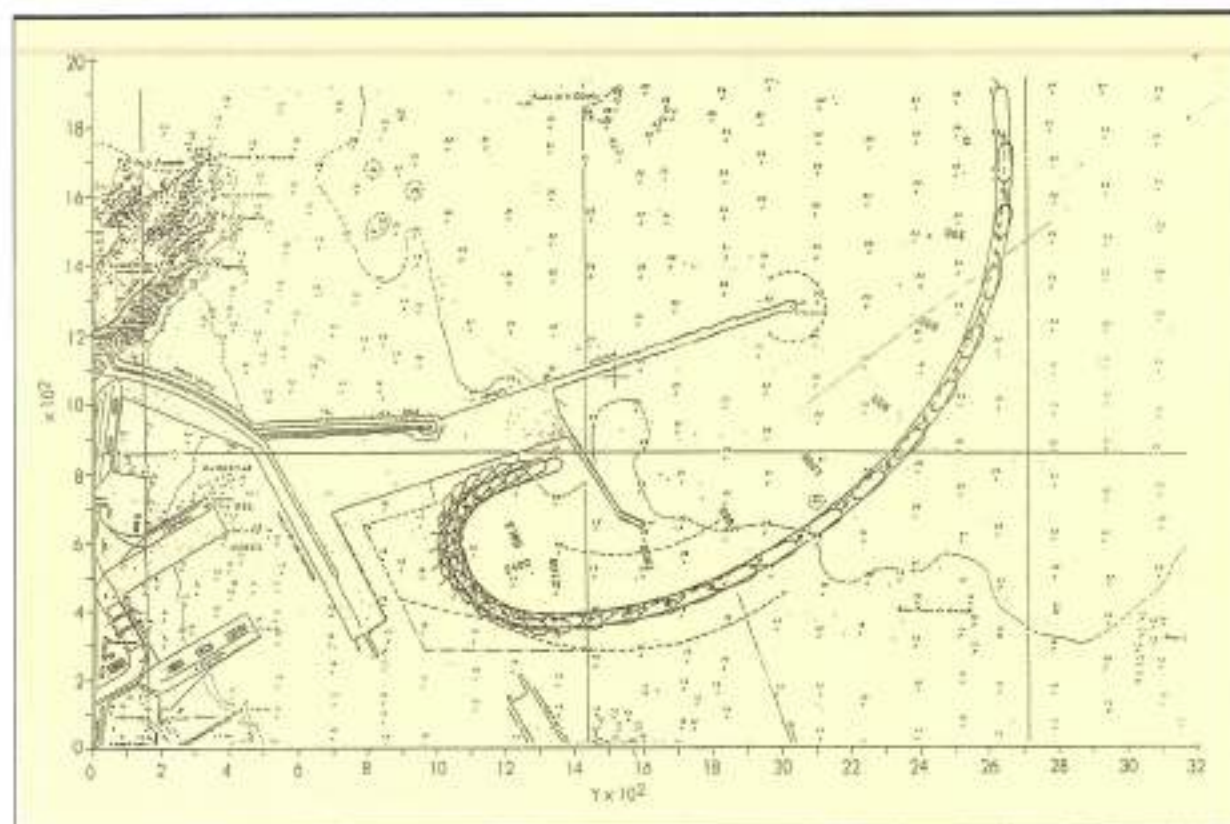


FIGURA 6. Modelo de Maniobrabilidad SHIPMA.

del grado de conocimiento que se tenga de los distintos fenómenos que, individual o simultáneamente, se originan en el mar.

Resulta paradójico que existan modelos tanto físicos como numéricos, capaces de simular oleaje real (direccional) cuya aplicabilidad se vea muy limitada dado el desconocimiento de la verdadera estructura del oleaje direccional. Similares situaciones nos encontramos en los estudios relativos a las ondas largas o, en ciertos casos de maniobrabilidad donde el desconocimiento de la frecuencia excitadora, en el primer caso, o del campo de corrientes, en el último, hace inevitable establecer estos parámetros en base a la propia experiencia.

En este sentido queremos indicar la necesidad de potenciar la toma de medidas de las distintas variables oceanográficas con el fin de que en un futuro próximo podamos predecir o plantear soluciones con mejores resultados.

BIBLIOGRAFIA

- GRASSA, J. M. (1989). *Modelo numérico de propagación de oleaje irregular direccional*. Clave CEDEX 22-415-9-083.
 ORTIZ, P., y PASTOR, M. (1989). «Ondas largas en puertos; análisis numérico», *Ingeniería Civil* (72), 114-122.
 SHIPMA (1987). *Fast-time simulation program for ship manoeuvring. User's manual*. Delft Hydraulics.
 S21 USER'S GUIDE (1980). Danish Hydraulic Institute.