

**MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN FEDERAL, INVERSIÓN PÚBLICA Y SERVICIOS  
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS  
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS**

**INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA**

**LABORATORIO DE HIDRÁULICA**

---

*REMODELACION DEL PUERTO DE QUEQUEN*

**ESTUDIO MEDIANTE MODELACION MATEMATICA  
DE PROPAGACION DE OLAS**

**INFORME FINAL**

*Abril, 2004*

**Informe LHA-233-01-04**

**INA  
LABORATORIO DE HIDRAULICA**

**DIRECTOR**

*Ing. J.C. De Lío*

---

**Informe producido por**

*Ing. R. Castellano*

**Equipo de trabajo**

*Ing. N. Tomazin  
Sr. C.A. Haspert*

**Asesor**

*Dr. A.N. Menéndez*

# INDICE DE MATERIAS

<b>1</b>	<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DEL ESTUDIO.....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>DESCRIPCION DE LAS OBRAS.....</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>DESCRIPCION FISICA DE LA REGION.....</b>	<b>4</b>
<b>4.1</b>	<b>Información batimétrica.....</b>	<b>4</b>
<b>4.2</b>	<b>Planos de referencia.....</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>MODELO MATEMATICO DE PROPAGACION DE OLAS.....</b>	<b>6</b>
<b>5.1</b>	<b>Descripción del modelo matemático.....</b>	<b>6</b>
<b>5.2</b>	<b>Implementación del modelo.....</b>	<b>7</b>
5.2.1	Red de elementos finitos.....	7
5.2.2	Contornos del dominio de cálculo.....	7
5.2.3	Escenarios de cálculo.....	8
5.2.4	Representación del espectro de olas incidentes.....	9
<b>6</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>10</b>
<b>6.1</b>	<b>Escollera prolongada.....</b>	<b>10</b>
<b>6.2</b>	<b>Escollera actual.....</b>	<b>11</b>
<b>6.3</b>	<b>Interpretación de los resultados para la comparación con la modelación física.....</b>	<b>13</b>

## INDICE DE FIGURAS

- Figura 1 Obra de ampliación de la escollera Sur
- Figura 2 Zona de ubicación
- Figura 3 Espectro de densidad de energía de olas (JONSWAP)
- Figura 4 Contorno portuario actual
- Figura 5 Contorno con escollera prolongada
- Figura 6 Escollera prolongada Dir S - NM = 3.20 m - T = 12s
- Figura 7 Escollera prolongada Dir S - NM= 0 m - T=12s
- Figura 8 Escollera prolongada Dir S - NM = 3.20 m - T=15s
- Figura 9 Escollera prolongada Dir S - NM = 0m - T= 15s
- Figura 10 Escollera prolongada Dir SE - NM = 3.20m - T =12s
- Figura 11 Escollera prolongada Dir SE - NM =0 m - T = 12s
- Figura 12 Escollera prolongada Dir SE - NM = 3.20m - T = 15s
- Figura 13 Escollera prolongada Dir SE- NM= 0 m- T =15s
- Figura 14 Escollera prolongada Dir E - NM = 3.20 m- T= 6s
- Figura 15 Escollera prolongada Dir E - NM = 0 m- T = 6s
- Figura 16 Escollera prolongada Dir E - NM = 3.20 m - T = 8s
- Figura 17 Escollera prolongada Dir E - NM =0 m - T = 8s
- Figura 18 Escollera Actual Dir S - NM = 3.20 m - T = 12s
- Figura 19 Escollera Actual Dir S - NM = 3.20 m - T = 15s
- Figura 20 Escollera Actual Dir SE - NM = 3.20 m - T = 12s
- Figura 21 Escollera Actual Dir SE - NM =3.20m - T =15s
- Figura 22 Perfil comparativo Dir S-NM=3.20m-T=12s
- Figura 23 Perfil comparativo Dir S-NM =3.20 m- T=15s
- Figura 24 Perfil comparativo Dir SE-NM=3.20m - T=.12s
- Figura 25 Perfil comparativo Dir SE-NM = 3.20m - T=15s
- Figura 26 Ubicación de puntos de comparación

## **ESTUDIO MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA DE PROPAGACION DE OLAS**

### **INFORME FINAL**

#### **1 INTRODUCCION**

La Provincia de Buenos Aires ha licitado un proyecto de ampliación de las instalaciones del Puerto de Quequén (*Remodelación del Puerto de Quequén*) consistente en la remodelación de un tramo de la actual escollera sur, y su prolongación en una extensión de 500 m.

A requerimiento de DYCASA - Dragados Obras y Proyectos - U.T.E., adjudicataria de las obras, el **LABORATORIO DE HIDRAULICA (LHA)**, dependiente del INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA (INA), ha realizado los estudios mediante modelación matemática de la propagación de olas, a los efectos de evaluar la capacidad de protección que las obras proveen al canal de acceso e interior del puerto.

## 2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

La modelación matemática realizada estuvo dirigida a verificar la atenuación al ingreso de olas que la prolongación de la escollera permitirá lograr con respecto a la actual configuración. Aunque es de especial interés la evaluación del canal de navegación de acceso al puerto, la modelación abarcó la totalidad del área portuaria.

Para analizar la agitación en el recinto portuario, bajo la influencia de las olas que arriban al lugar de emplazamiento, se utilizaron técnicas de simulación numérica, que se describen en el Apartado 5.

### 3 DESCRIPCION DE LAS OBRAS

Las nuevas obras de abrigo consisten en la prolongación de la escollera Sur en una extensión de 400 m y en la reparación y remodelación de la actual escollera sur en el tramo de empalme entre ambas obras.

El proyecto prevé que los taludes de la obra de abrigo estén protegidos con unidades prefabricadas Core-Loc, de tamaño variable a lo largo de la misma.

El esquema de las obras se muestra en la **Figura 1**. El morro de la prolongación de la escollera estará ubicado en el entorno de la isobata de 12 m.

Canal de acceso tiene una profundidad de 12.8 m bajo el plano de referencia a la altura de la escollera Norte (progresiva 0m) y un ancho de solera de 120 m. La profundidad se incrementa a 13.0 m a la altura de la progresiva 40 m, a 13.50 m en progresiva 260 m, y alcanza los 14 m en progresiva 430m. El ancho de solera se incrementa linealmente de 120 m en progresiva 556m a 140 m en progresiva 756 m.

## 4 DESCRIPCIÓN FÍSICA DE LA REGIÓN

El puerto de Quequén, se halla ubicado en la desembocadura del río homónimo en el océano Atlántico, en las coordenadas geográficas 38° 35' de latitud Sur y 58° 42' de longitud Oeste (**Figura 2**), al sur de la Provincia de Buenos Aires.

La línea de costa es francamente rectilínea, con orientación WSW a ENE. Las isobatas de 10 y 20 m de profundidad muestran también estas tendencias. La primera se halla a unos 1000 m de la línea de costa y la segunda a una distancia variable entre 2500 y 3500 m.

El sitio de emplazamiento resulta expuesto a olas oceánicas que tienen una dirección predominante del S y SE. Estas olas, por su dirección relativa respecto de las isobatas, son las que llegan a la costa con menor alteración por efectos de refracción.

El régimen de mareas es predominantemente semidiurno. El nivel Medio se halla a 0,98 m por encima del plano de reducción y la pleamar astronómica máxima es de +2 m sobre ese plano de referencia. Los efectos meteorológicos pueden modificar los niveles de mareas astronómicas. Para el diseño de obras se ha previsto un nivel extremo de +3.20 m correspondiente a un período de retorno de 50 años

### 4.1 Información batimétrica

La información batimétrica de detalle suministrada por DYCASA –DOPSA corresponde a relevamientos realizados en el área y estuvo contenida en los siguientes archivos:

- CA030911
- CA030726
- ES030726
- ES030815
- MO030803
- MO030815
- MP030803
- PL 030803

Estos archivos contienen valores de coordenadas X,Y,Z de relevamientos realizados en el entorno de las actuales obras y en la traza de la futura escollera. Las coordenadas X,Y están expresadas en m, en sistema Gauss-Kruger. La coordenada Z representa la profundidad local, se expresa en m y está referida al plano de reducción del SHN.

Como información complementaria para cubrir el área a modelar se utilizaron las siguientes Cartas Náuticas Publicadas por el Servicio de Hidrografía Naval de la Armada Argentina (SHN), las que fueron parcialmente digitalizadas:

Carta H 253 Puerto Quequén. Proyección Mercator. Escala 1:5.000  
Carta N° 252. Rada Quequén. Proyección Mercator 1: 50.000

## **4.2 Planos de referencia**

El plano de referencia de la información mareológica y batimétrica publicada por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) es el límite inferior de la media de bajamares de sicigias.

## 5 MODELO MATEMATICO DE PROPAGACION DE OLAS

### 5.1 Descripción del modelo matemático

La simulación numérica de la agitación en un recinto portuario requiere de un modelo matemático relativamente sofisticado que debe contemplar los mecanismos dominantes de transformación de las olas: la difracción, la reflexión y la refracción.

De ellas, la última juega un rol secundario debido a la topografía relativamente plana del fondo, a excepción de las zonas de los canales de navegación. Esto conduce a un problema diferencial de tipo elíptico, es decir, produce un acoplamiento de la solución en todo el dominio y, en consecuencia, a la necesidad de resolver grandes sistemas de ecuaciones algebraicas.

El modelo matemático básico de agitación en recintos portuarios fue desarrollado por Berkhoff<sup>1,2</sup> Combinando su "ecuación para los taludes suaves" con apropiadas condiciones de borde, es posible simular adecuadamente cualquier problema práctico, una vez definida la ola incidente.

La solución del problema matemático planteado se encara, en general, por el método de los elementos finitos, especialmente apto para problemas diferenciales elípticos. La red de cálculo se genera de modo tal de ajustarse al contorno de la región de interés por una parte y, de tener un además un paso suficientemente pequeño respecto de la longitud de onda de la ola más corta, de modo de representarla adecuadamente. El contorno de la región de cálculo está caracterizado por bordes físicos coincidentes con tramos de costa, muelles, escolleras, u otras estructuras, y por bordes radiantes en los que se impone la condición de ola del caso, es decir su altura, período y dirección de propagación

Como solución, el modelo de Berkhoff provee la distribución espacial de alturas de ola en todo el interior de la red computacional, que es el resultado de interés ingenieril y, eventualmente, el campo de direcciones de propagación.

El LHA dispone del programa *DIFRAC*<sup>3</sup>, que tiene implementada la metodología descrita. Más detalles técnicos de este tipo de modelo se presentan en el **Anexo I**.

El modelo de Berkhoff puede ser aplicado a olas que responden a una distribución espectral en frecuencia apelando al principio de superposición, dado el carácter lineal de las ecuaciones. Para ello los espectros se discretizan y se obtienen soluciones para todas las combinaciones de frecuencias. La solución final resulta de la suma de las soluciones particulares para cada banda de frecuencia en que se ha discretizado el espectro.

Para el espectro de frecuencia se utilizó la expresión del **Joint North Sea Wave Project** (JONSWAP)<sup>4</sup> que proporciona una relación funcional entre la densidad de energía  $S(f)$  contenida en un entorno infinitamente pequeño de la frecuencia  $f$ :

$$S(f) = \beta_j H_p^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}(T_p f)^{-4}\right] \cdot \gamma^{\exp\left[-\left(\frac{f}{f_p} - 1\right)^2 / 2\sigma^2\right]} \quad (1)$$

donde

$$\beta_j = \frac{0.06238}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} [1.094 - 0.01915 \ln \gamma]$$

$H_{1/3}$  es la altura significativa (una medida de la energía total contenida),  $T_p$  el período de pico espectral ( $T_p = 1/f_p$ ),  $\sigma = 0.07$  para frecuencias menores que la de pico y  $\sigma = 0.09$  para frecuencias mayores.  $\gamma$  es el coeficiente de apuntamiento del espectro, variable entre 1 y 7 y con un valor promedio de 3,3, que es el que se ha adoptado en el presente estudio.

La **Figura 3** muestra dos espectros de densidad de energía, uno correspondiente a una altura de ola significativa  $H_s = 7,20$  m,  $T_p = 12$  s y el otro a una ola de altura significativa  $H_s = 4$  m y  $T_p = 6$  s. En ambos casos el valor del coeficiente de apuntamiento  $\gamma$  fue 3.3.

## 5.2 Implementación del modelo

### 5.2.1 Red de elementos finitos

Se generó una red de elementos finitos para cada una de las dos configuraciones portuarias analizadas. El área estuvo delimitada por los contornos que se indican en las **Figuras 4 y 5**, respectivamente para cada una de las configuraciones estudiadas (puerto actual y con escollera prolongada).

Los escollerados y márgenes del río y de del antepuerto constituyen límites físicos, coincidentes con el contorno interior del puerto y de las respectivas escolleras.

Otros límites del área modelada son de carácter virtual y fueron definidos como contornos rectilíneos. En el caso del límite E, el mismo tuvo orientación N-S y se ubicó a unos 1000 m al E del extremo de la escollera prolongada. El límite Sur tuvo orientación E-O y se ubicó a aproximadamente 750 m al S del extremo de la escollera.

Para una adecuada resolución del problema se adoptó una malla computacional compuesta de aproximadamente 95.000 elementos triangulares que cubrieron un área del orden de 3.500.000 m<sup>2</sup>. A cada elemento se le asignó la profundidad correspondiente, de acuerdo a la batimetría utilizada. En la región NE del dominio computacional correspondiente a la zona costera, la información batimétrica es pobre, porque es una zona que no estuvo abarcada por los relevamientos realizados específicamente para el proyecto y porque las cartas náuticas presentan poca información al no ser de interés para la navegación. Esto inevitablemente se refleja en la verosimilitud de los resultados de la simulación numérica en esa zona.

### 5.2.2 Contornos del dominio de cálculo

Los contornos del área de cálculo (**Figuras 4 y 5**) están compuestos por límites físicos (muelles, playa, escolleras), que son contornos con determinadas propiedades reflejantes para las ondas que inciden sobre los mismos. El coeficiente de absorción  $\alpha$ , requerido por el sistema DIFRAC, se vincula con el coeficiente de reflexión  $K_r$  mediante:

$$\alpha = \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \quad (2)$$

A los coeficientes de reflexión de las escolleras se les asignó el valor determinado en los estudios en modelo físico realizados en el Instituto de Hidrodinámica Aplicada de Barcelona, España (INHA). La playa fue tratada como un contorno absorbente. La utilización de los coeficientes de absorción asociados a un contorno permite incorporar al cálculo el concepto de rotura de las olas, al ser éste un mecanismo de disipación de energía.

Los contornos matemáticos (borde E, S y W) son tratados como radiantes, lo que significa que la energía de olas puede entrar al dominio de cálculo a través de ellos (mediante la imposición de un valor de altura, período y dirección) o ser radiada hacia el exterior. Se consideraron las siguientes características de absorción en los contornos del modelo:

**Tabla 1.** Propiedades reflejantes de los contornos

TRAMO	DESCRIPCION	Kr	$\alpha$
1	playa	0	1.00
2	escollera norte	0.5	0.33
3	dársena	1	0.00
4	ribera norte (sitios 1 a 6)	0.3	0.54
5	muro norte	1	0.00
6	rio	0	1.00
7	muro sur	1	0.00
8	ribera sur (sitios 7 a 12 y salida usina)	0.3	0.54
9	ribera sur	0.3	0.54
10	escollera sur existente (lado dársena)	0.43	0.40
11	escollera sur (extensión)	0.43	0.40
12	escollera sur existente (lado mar)	0.43	0.40

### 5.2.3 Escenarios de cálculo

Según lo requerido por el Cliente se realizaron las simulaciones para los escenarios hidrodinámicos descritos en las **Tablas 2 y 3**.

**TABLA 2** - Escenarios hidrodinámicos - Puerto con Escollera prolongada

CASO	NM (m)	DIR	T (s)
1	3.2	S	12
2	0	S	15
3	0	S	12
4	3.2	S	15
5	3.20	SE	12
6	3.20	SE	15
7	0	SE	12
8	0	SE	15
9	3.20	E	6
10	0	E	6
11	3.20	E	8
12	0	E	8

TABLA 3 Escenarios Hidrodinámicos - Puerto Actual

CASO	NM (m)	DIR	T (s)
1	3.20	S	15
2	3.20	S	12
3	3.20	SE	15
4	3.20	SE	12

#### 5.2.4 Representación del espectro de olas incidentes

Según se indicó, se adoptó como ola significativa la que tiene un período de retorno de 50 años, como indicadora de situaciones extremas. Para cada escenario estudiado se construyó el espectro de frecuencia según la expresión del espectro JONSWAP con un coeficiente de apuntamiento  $\gamma = 3.3$ . La altura significativa  $H_s$  puede definirse a partir de la función de densidad espectral como:

$$H_s = 4 m_0'^2 \quad (3)$$

donde  $m_0$  es el momento de orden cero de la función de densidad, y se define como:

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(f) df \quad (4)$$

El espectro fue discretizado en 12 bandas de frecuencia. La elección de la cantidad de bandas de frecuencia de discretización del espectro es una solución de compromiso entre el tiempo de cálculo (cada banda de frecuencia requiere ser resuelta separadamente) y la resolución del espectro, que mejora con mayor cantidad de bandas. Tanto por la necesidad práctica de establecer frecuencias de corte mínimas y en especial máximas a la integral, como por el hecho de discretizar el espectro en un número relativamente reducido de bandas de frecuencia tanto el valor de  $m_0$  como el de  $H_s$ , resultan truncados respecto de los valores originales utilizados en la determinación de la función teórica  $S(f)$ . Consecuentemente la energía total que ingresa a la región de cálculo resulta también afectada.

Siguiendo un proceso inverso para la función de densidad espectral discretizada, y a partir de las ec. (3) y (4), es posible estimar el valor de  $H_s$  utilizado como altura de ola incidente sobre el contorno matemático del área modelada. Es este último valor de  $H_s$  el que ha sido utilizado como valor de referencia  $H_R$  para expresar las soluciones obtenidas, convirtiendo de esta manera las alturas de ola dentro de la región de cálculo  $H_i$  en *coeficientes de transformación*  $K_i$ , definido éste como:

$$K_i = \frac{H_i}{H_R} \quad (5)$$

## 6 RESULTADOS

Los resultados se presentan por una parte en forma gráfica, como líneas de igual coeficiente de transformación  $K$ , definido en la ec. (5) como el cociente entre la altura de ola en un punto dado y la ola incidente en el contorno del área modelada. Para aquellos casos en que se simularon las dos configuraciones portuarias (escollera actual y extendida), y a los efectos de facilitar la comparación entre ambas, también se han graficado los valores de  $K$  a lo largo de una poligonal que atraviesa el canal de navegación, el antepuerto y los sitios de amarre ubicados sobre el río.

Es importante señalar que los coeficientes de transformación  $K$ , si bien están referidos a una ola incidente en el borde del área modelada, representan la altura de ola resultante de la combinación de todos los fenómenos que determinan su propagación: la refracción, la difracción y la reflexión. Esto es importante en lo concerniente a las condiciones de agitación en el área estudiada, y no representa la ola puramente incidente sobre las estructuras utilizada en la evaluación de la estabilidad de las mismas.

### 6.1 Escollera prolongada

En las **Figuras 6 a 17** se presentan los resultados correspondientes a la escollera Sur prolongada, en las que se analizan las isolíneas del coeficiente  $K$  para las tres direcciones de incidencia estudiadas, con dos períodos de ola y dos niveles de mar.

Para la dirección de incidencia S (**Figuras 6 a 9**) el patrón general de distribución de las isolíneas  $K$  no presenta diferencias sustanciales en los cuatro escenarios analizados. En todo caso puede notarse una mayor sensibilidad a la variación del nivel del mar que al cambio de período.

Puede observarse que la isolínea de  $K=0.5$  se origina en el morro de la escollera y se orienta aproximadamente en la dirección de incidencia de las olas. En el antepuerto y resto del área portuaria el coeficiente  $K$  resulta menor que 0,10 en todos los casos.

Con referencia a la dirección de incidencia SE (**Figuras 10 a 13**), dado que el eje de la escollera se orienta aproximadamente con la dirección de incidencia de las olas, su eficiencia en la difracción de las olas resulta notoriamente disminuido, advirtiéndose en consecuencia una penetración considerablemente mayor de las olas al canal de navegación y al área portuaria.

Entre el eje del canal y la nueva escollera se nota la presencia de una región en la que  $K>1$ , lo que podría estar originado por los fenómenos de refracción de las olas debida al talud del canal y su posterior reflexión en la cara interna de la escollera. Esto es especialmente notorio para el nivel del mar de 0 m, donde la disminución de la profundidad relativa acentúa el fenómeno de refracción.

En los cuatro casos correspondientes a esta dirección, el coeficiente  $K$  adquiere valores próximos a 0,3 en la entrada al antepuerto, y menor que 0,10 en los sitios de amarre.

Finalmente, para la dirección E (**Figuras 14 a 17**), los gráficos permite advertir que los fenómenos de difracción y refracción no son dominantes en la generación del patrón de isolíneas. Esto puede explicarse si se tiene en cuenta que en estos casos las olas incidentes ( $T = 6s$ ,  $T = 8s$ ) son de longitud considerablemente menor que en las direcciones analizadas anteriormente y que estos fenómenos de transformación están asociados a la longitud de onda.

Puede notarse que el patrón de distribución de isólinas de  $K$  es muy uniforme. En la entrada al antepuerto  $K \approx 0.4 - 0.6$ . En el área del antepuerto los valores se reducen, variando  $K$  de 0.10 a 0.40. En los sitios de amarre  $K < 0.10$ .

## 6.2 Escollera actual

Para el puerto actual los resultados se presentan en las **Figuras 18 a 21**, en las que se observa las isólinas resultantes de la simulación de la propagación de olas para las direcciones de propagación de olas S, SE, y los períodos  $T= 12$  s y  $T= 15$  s. El nivel del mar fue en todos los casos de +3.20 m.

Las **Figuras 18 y 19** corresponden a la dirección S. Puede observarse que el patrón de isólinas presenta variaciones respecto de la misma condición analizada en el caso de la escollera extendida (**Figura 6**). La tendencia anteriormente observada de la isólinea  $K=0.5$  a seguir la orientación de la dirección de incidencia de las olas, se ve modificada, orientándose en este caso hacia la escollera Norte. Esto se debe probablemente al hecho de que, dada la ubicación de la escollera actual en aguas menos profundas, el efecto de refracción es mayor que en el caso de la escollera extendida.

Se observa además una mayor agitación en el área del antepuerto lo que refleja la eficiencia de la escollera extendida para la atenuación de las olas que inciden desde esta dirección.

Las **Figuras 20 y 21** muestran los resultados correspondientes a la dirección SE. En este caso no se observan diferencias notorias con respecto a la configuración del puerto con escollera extendida. Las pequeñas diferencias que pueden notarse corresponden al caso de  $T= 12$  s, en el que la escollera extendida mejora levemente las condiciones de agitación en la zona del antepuerto.

Con el propósito de robustecer la comparación entre ambas configuraciones de obra, en las **Figuras 22 a 25** se grafican los valores del coeficiente de transformación  $K$  a lo largo del eje del canal para los cuatro casos mencionados. El eje del canal se muestra en la **Figura 26**. La progresiva indicada en las **Figuras 22 a 25** se contabiliza a partir del extremo NW del área modelada.

En las **Figuras 22 y 23**, correspondientes a dirección de incidencia S, se observa nuevamente una diferencia considerable entre ambas curvas, pudiendo notarse un corrimiento equivalente a la longitud de la nueva escollera (~ 400 m) hecho que vuelve a señalar la eficiencia de la obra proyectada.

Por el contrario, puede notarse que la extensión de la escollera no produce modificaciones sustanciales en la agitación en la zona de estudio, cuando las olas inciden en la dirección SE, lo que puede observarse en las **Figuras 24 y 25**.

Finalmente en las **Tablas 4 a 7** se indican los valores de coeficiente de transformación para algunas posiciones ubicadas a lo largo del eje del canal, y para los cuatro escenarios para los que se realizaron simulaciones con y sin escollera prolongada. La ubicación de los puntos de cálculo se indican en la **Figura 26**. Los valores de coeficiente de transformación en estas tablas han sido determinados como promedio en una región circular con un radio de 25 m, en la que se hallan alrededor de 30 puntos de cálculo de la red de elementos finitos. La variación porcentual VP ha sido expresada como:

$$VP = \frac{K_{FUTURO} - K_{ACTUAL}}{K_{ACTUAL}} \cdot 100 \quad (6)$$

**Tabla 4. Dir =S - NM =3.20m - T=12s**

Ubicación	Descripción	Coeficiente de Transformación		VP (%)
		Actual	Con escollera prolongada	
1	Exterior	1.05	1.04	-1
2	Morro Futura Escollera	1.01	1.00	-1
3	Morro Actual	1.08	0.16	-85
4	Morro Norte	0.15	0.04	-73
5	Antepuerto	0.06	0.01	-83
6	Sitio 1	0.02	0.00	-100
7	Sitios 3 y 12	0.01	0.00	-100
8	Sitios 5 y 10	0.01	0.00	-100

**Tabla 5. Dir=S - NM=3.20m - T=15s**

Ubicación	Descripción	Coeficiente de Transformación		VP (%)
		Actual	Con escollera prolongada	
1	Exterior	1.04	0.99	-5
2	Morro Futura Escollera	1.00	1.00	0
3	Morro Actual	1.03	0.16	-84
4	Morro Norte	0.12	0.03	-75
5	Antepuerto	0.05	0.02	-60
6	Sitio 1	0.01	0.00	-100
7	Sitios 3 y 12	0.01	0.00	-100
8	Sitios 5 y 10	0.01	0.00	-100

**Tabla 6. Dir=SE - NM=3.20m – T=12s**

Ubicación	Descripción	Coeficiente de Transformación		VP (%)
		Actual	Con escollera prolongada	
1	Exterior	0.74	0.58	-22
2	Morro Futura Escollera	1.01	1.01	0
3	Morro Actual	1.01	1.00	-1
4	Morro Norte	0.42	0.22	-48
5	Antepuerto	0.20	0.11	-45
6	Sitio 1	0.06	0.04	-33
7	Sitios 3 y 12	0.04	0.02	-50
8	Sitios 5 y 10	0.03	0.02	-33

**Tabla 7. Dir=SE - NM=3.20m – T=15s**

Ubicación	Descripción	Coeficiente de Transformación		VP (%)
		Actual	Con escollera prolongada	
1	Exterior	0.80	0.72	-10
2	Morro Futura Escollera	1.10	1.12	+2
3	Morro Actual	0.92	0.88	-5
4	Morro Norte	0.26	0.19	-27
5	Antepuerto	0.09	0.12	+33
6	Sitio 1	0.03	0.02	-33
7	Sitios 3 y 12	0.02	0.01	-50
8	Sitios 5 y 10	0.01	0.01	0

### 6.3 Interpretación de los resultados para la comparación con la modelación física

A los efectos de facilitar la comparación de los resultados de la simulación numérica con los obtenidos de un modelo físico 3D, en las **Tablas 8 a 15** se indican los coeficientes de transformación K en 14 sitios aproximadamente coincidentes con los puntos de medición en el modelo físico realizado por el **INHA** de Barcelona.

Para una adecuada interpretación de estos resultados se debe tener en cuenta que los valores de K aquí presentados están referidos, como se indicó anteriormente, a la altura de ola incidente en el borde del área modelada. En el modelo físico 3D el **punto 1** indicado en las tablas fue utilizado para el ajuste de la altura de ola correspondiente al ensayo. Para referir los resultados de esta simulación numérica a dicha ubicación, es necesario dividir el valor K correspondiente a un punto determinado por el valor del coeficiente correspondiente al **punto 1** en cada tabla.

**Tabla 8. Dir =S - NM =3.20m - T=12s**

Punto	X (m)	Y(m)	K(%)
1	3115	825	1.02
2	2870	1310	1.14
3	2985	1210	1.06
4	3090	1115	1.00
5	3180	1035	0.99
6	3300	1030	0.92
7	3340	1155	0.90
8	3225	1235	0.18
9	3155	1290	0.13
10	3075	1360	0.14
11	3420	1335	1.07
12	3300	1365	0.51
13	3230	1405	0.33
14	3165	1420	0.22

**Tabla 9. Dir=S - NM=3.20m - T=15s**

Punto	X (m)	Y(m)	K(%)
1	3115	825	1.04
2	2870	1310	1.09
3	2985	1210	1.09
4	3090	1115	0.96
5	3180	1035	1.00
6	3300	1030	0.96
7	3340	1155	0.86
8	3225	1235	0.18
9	3155	1290	0.13
10	3075	1360	0.14
11	3420	1335	1.05
12	3300	1365	0.50
13	3230	1405	0.32
14	3165	1420	0.23

**Tabla 10. Dir=S - NM=0m - T=12s**

Punto	X (m)	Y(m)	K(%)
1	3115	825	0.99
2	2870	1310	1.32
3	2985	1210	1.18
4	3090	1115	1.03
5	3180	1035	1.05
6	3300	1030	0.96
7	3340	1155	0.96
8	3225	1235	0.21
9	3155	1290	0.28
10	3075	1360	0.21
11	3420	1335	1.10
12	3300	1365	0.58
13	3230	1405	0.40
14	3165	1420	0.27

**Tabla 11. Dir=S - NM=0m - T=15s**

Punto	X (m)	Y(m)	K(%)
1	3115	825	1.07
2	2870	1310	1.26
3	2985	1210	1.18
4	3090	1115	1.03
5	3180	1035	1.01
6	3300	1030	0.94
7	3340	1155	0.87
8	3225	1235	0.23
9	3155	1290	0.17
10	3075	1360	0.20
11	3420	1335	1.06
12	3300	1365	0.56
13	3230	1405	0.39
14	3165	1420	0.27

**Tabla 12. Dir=SE - NM=3.20m - T=12s**

Punto	X (m)	Y(m)	K(%)
1	3340	890	1.19
2	2870	1310	0.83
3	2985	1210	0.81
4	3090	1115	0.87
5	3180	1035	1.17
6	3245	1005	1.10
7	3300	1030	1.44
8	3345	1085	1.44
9	3338	1155	1.12
10	3225	1235	0.60
11	3155	1290	0.64
12	3075	1360	0.76
13	3230	1405	1.14
14	3165	1420	1.21

**Tabla 13. Dir=SE - NM=3.20m - T=15s**

Punto	X (m)	Y(m)	K(%)
1	3340	890	1.25
2	2870	1310	0.79
3	2985	1210	0.82
4	3090	1115	0.96
5	3180	1035	1.36
6	3245	1005	1.35
7	3300	1030	1.55
8	3345	1085	1.46
9	3338	1155	1.15
10	3225	1235	0.47
11	3155	1290	0.46
12	3075	1360	0.74
13	3230	1405	1.15
14	3165	1420	0.87

Tabla 14. Dir=SE - NM=0m - T=12s

Punto	X (m)	Y(m)	K(%)
1	3340	890	1.20
2	2870	1310	1.12
3	2985	1210	0.98
4	3090	1115	1.09
5	3180	1035	1.23
6	3245	1005	1.19
7	3300	1030	1.20
8	3345	1085	1.01
9	3338	1155	1.31
10	3225	1235	0.97
11	3155	1290	1.28
12	3075	1360	1.50
13	3230	1405	0.91
14	3165	1420	1.02

Tabla 15. Dir=SE - NM=0m - T=15s

Punto	X (m)	Y(m)	K(%)
1	3340	890	1.33
2	2870	1310	1.07
3	2985	1210	1.08
4	3090	1115	1.11
5	3180	1035	1.45
6	3245	1005	1.39
7	3300	1030	1.16
8	3345	1085	1.00
9	3338	1155	1.12
10	3225	1235	0.83
11	3155	1290	1.29
12	3075	1360	1.27
13	3230	1405	0.96
14	3165	1420	1.00

De acuerdo a lo expresado, tomando como ejemplo el caso presentado en la **Tabla 15** (dirección SE, NM = 0m, T=15s ), la ubicación 1 donde K = 1,33 fue la posición en que se ajustó la altura de ola para el ensayo (H= 7,20 m). Si se deseara determinar la altura de ola en el punto 5 donde K = 1.45, resultaría  $H_5 = 7,20 \times 1.45/1.33 = 7.85$  m.

## CONCLUSIONES

Se realizaron simulaciones numéricas mediante el sistema DIFRAC del puerto de Quequén, para el estudio de las obras de extensión de la escollera Sur. Los mismos se refieren a la agitación por oleaje especialmente en el canal de navegación y el interior del área portuaria. Se analizaron distintos escenarios hidrodinámicos y dos configuraciones de obras: la escollera sur actual y la nueva escollera proyectada.

Los procesos dominantes de transformación de las olas que arriban al área portuaria son la difracción y reflexión por efecto de las estructuras portuarias (escolleras), y la refracción por efecto del fondo, especialmente por la presencia del canal de acceso al puerto, hecho que resulta más notorio para los escenarios con marea baja y mayor período de olas.

De acuerdo a lo observado para las olas que inciden desde el Sur, dado el ángulo relativo entre el eje de la escollera y la dirección de las olas, la difracción juega un papel preponderante en la atenuación de las condiciones de agitación generando una importante reducción de la altura de ola.

Comparando la configuración actual del puerto con la obra proyectada, se destaca la importante mejora que la misma genera sobre el tramo protegido del canal de navegación y el antepuerto, para las olas incidiendo desde el S.

Para las olas que inciden desde el SE, dada la geometría y orientación de la escollera proyectada, la difracción de las olas no es un factor preponderante. Los efectos dominantes que se advierten en este caso son la refracción en los taludes del canal de navegación, particularmente el talud sur, el que produce una reorientación de los frentes de onda hacia la escollera y su posterior reflexión hacia el canal, lo que genera un incremento en la agitación en esta región.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

---

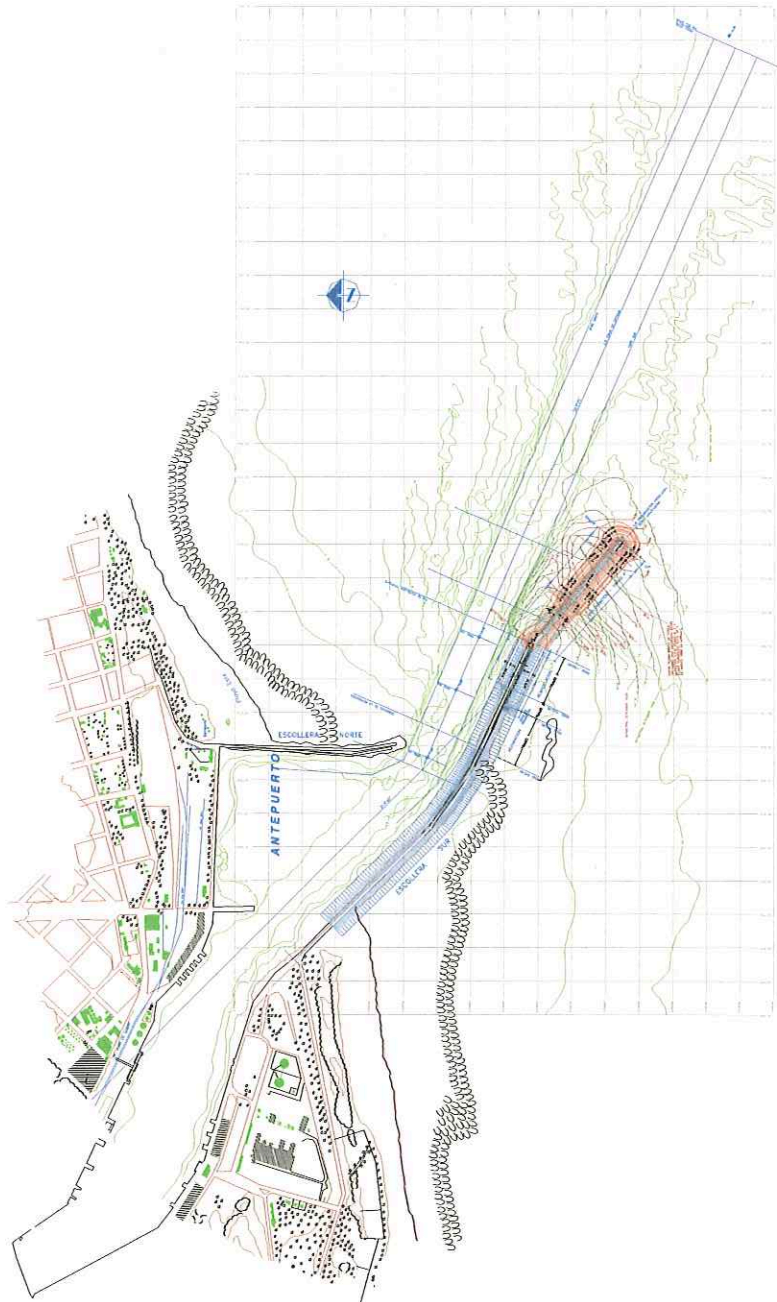
<sup>1</sup> Computation of combined refraction-diffraction, J.C.W. Berkhoff, Proc. 13<sup>th</sup>. Conference on Coastal Engineering, Vancouver, 1972.

<sup>2</sup> Difracción -Refracción Combinadas en Ondas de Agua. C. Vionnet. LHA 064-02-87.

<sup>3</sup> Estudio de las condiciones de agitación por oleaje en un puerto mediante simulación numérica, M.A. Cavaliere, A.N. Menéndez y R. Castellano, Revista Int. de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol. 8, 4, pp. 323-333 (1982)

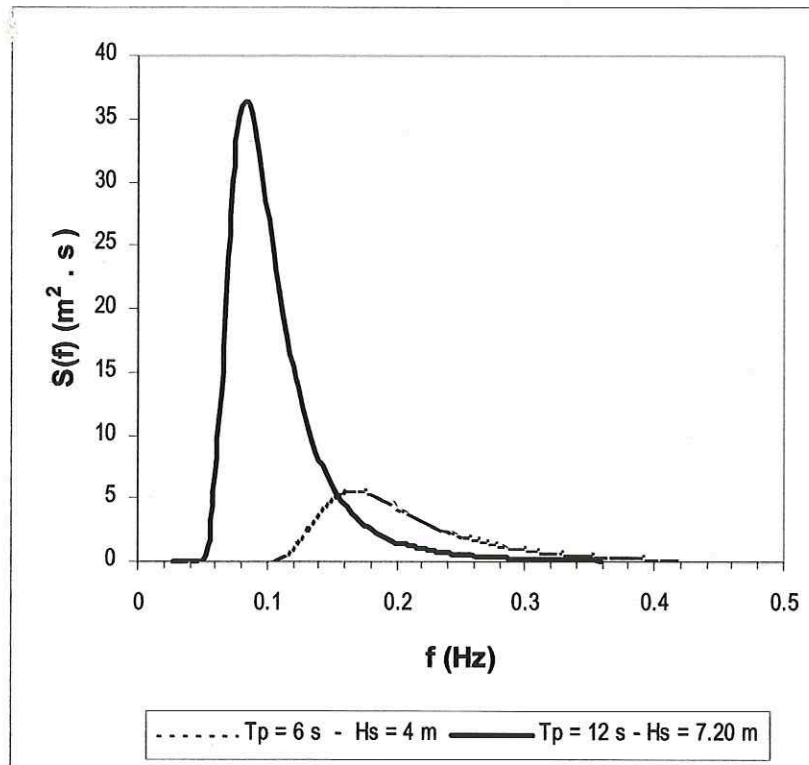
<sup>4</sup> Random Waves and Spectra, Yoshimi Goda, HANDBOOK OF COASTAL AND OCEAN ENGINEERING. Ch. 4. John B. Herbich, Editor, 1991.

# FIGURAS

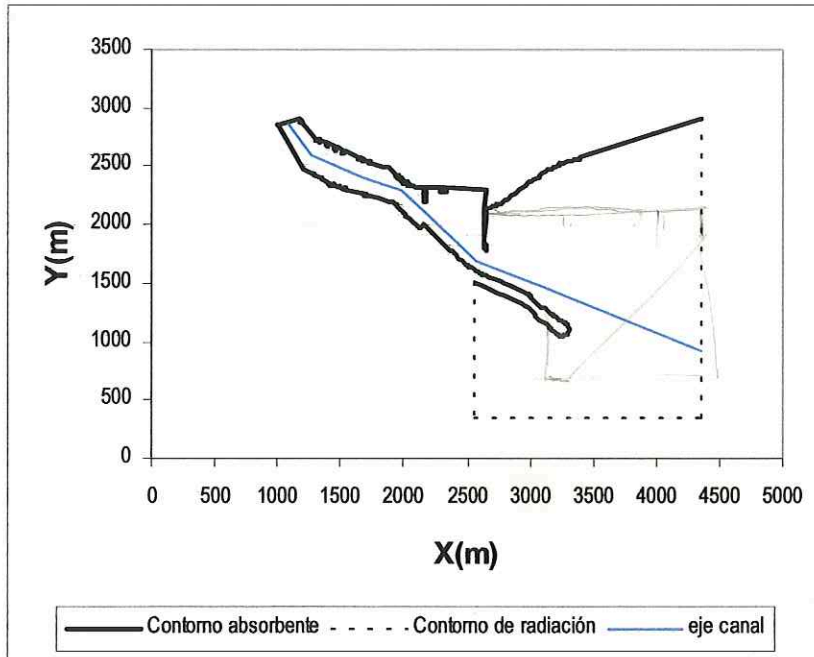


**FIGURA 1** - Obra de ampliación de la escollera sur

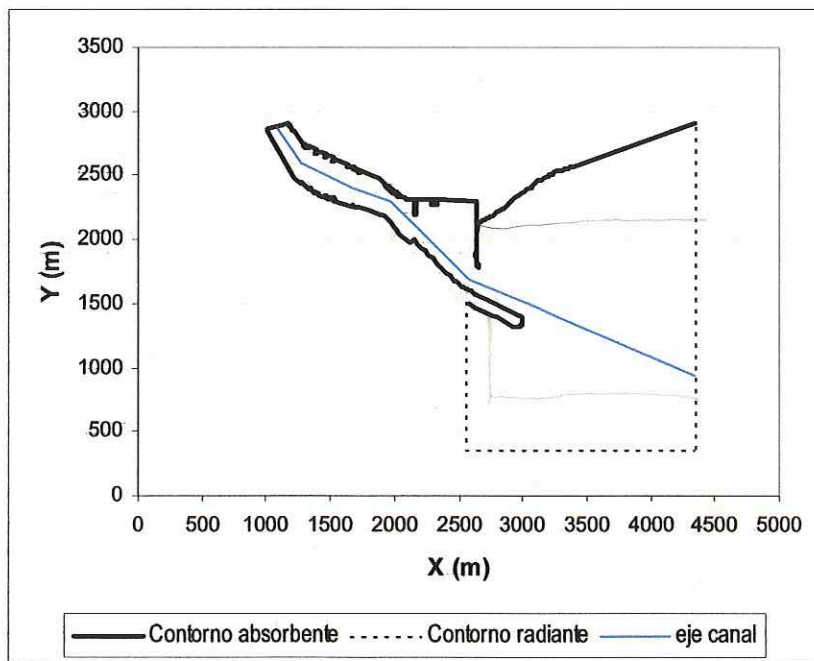




**FIGURA 3 – Espectros de densidad de energía (JONSWAP)**



**FIGURA 4 –** Area modelada (escollera sur proyectada)



**FIGURA 5 –** Area modelada . Situación actual

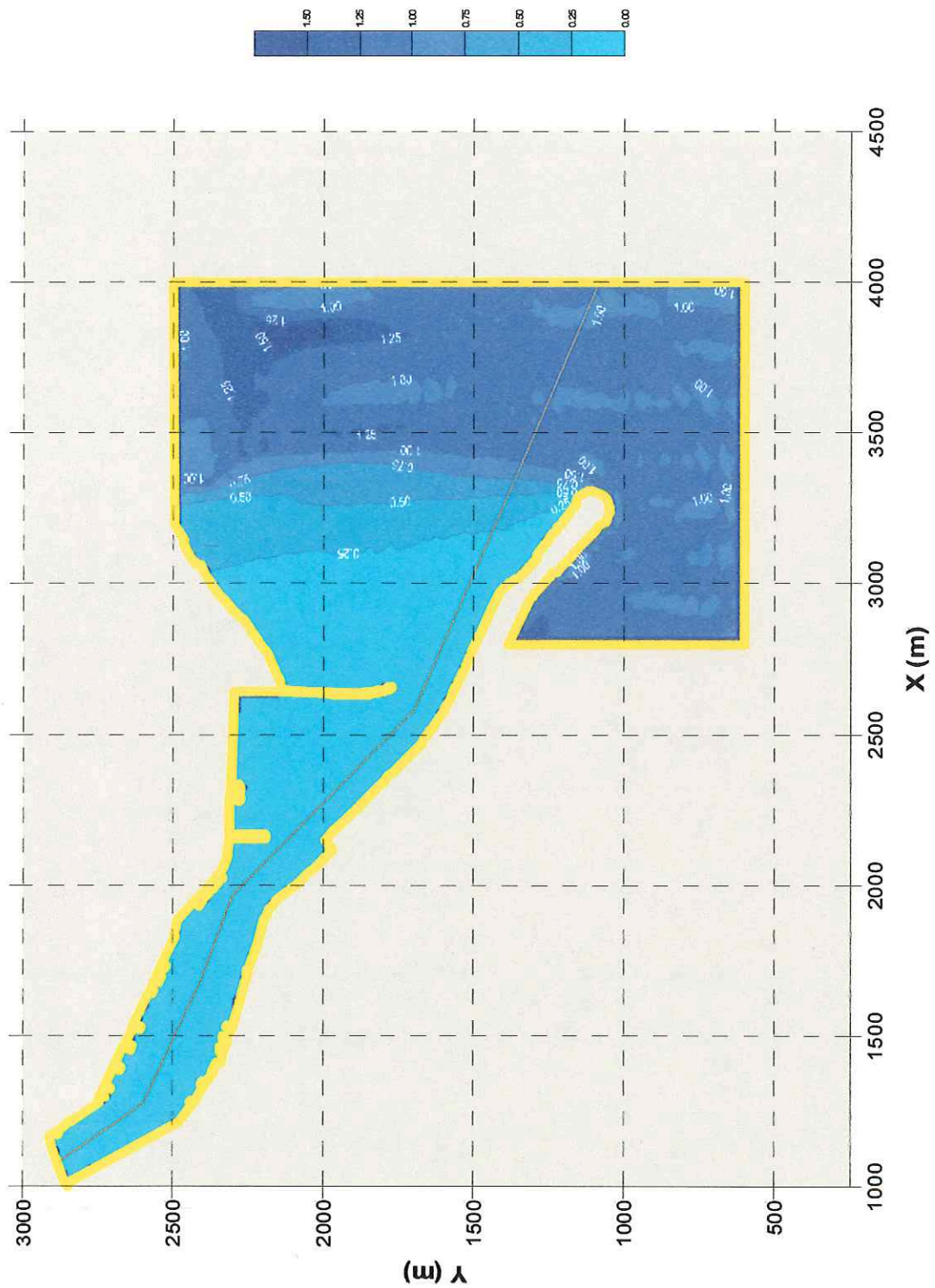


Figura 6. Escollera Prolongada Dir S - NM = 3.20 m - T= 12 s

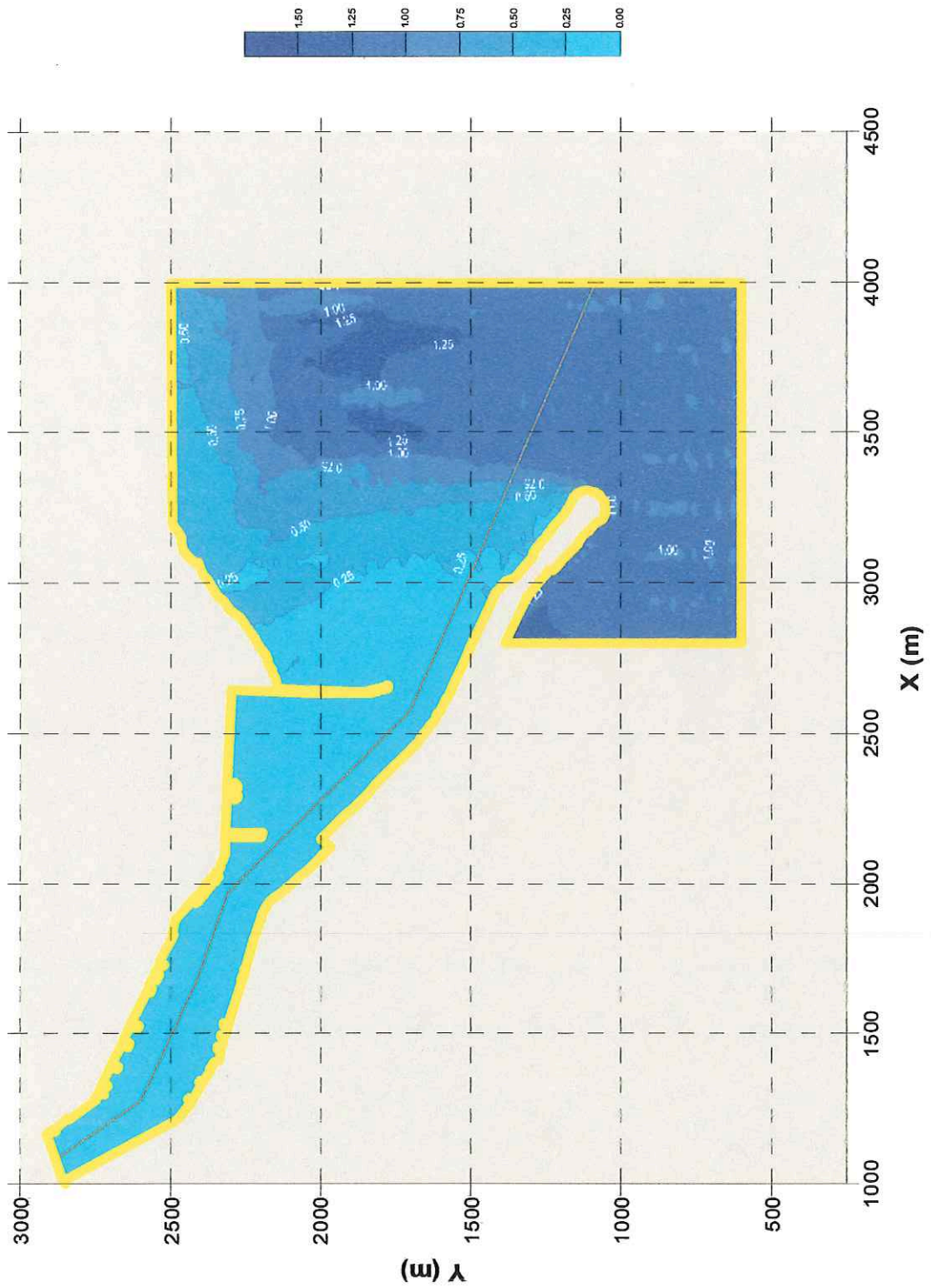


Figura 7. Escollera Prolongada Dir S - NM = 0.00 m - T= 12 s

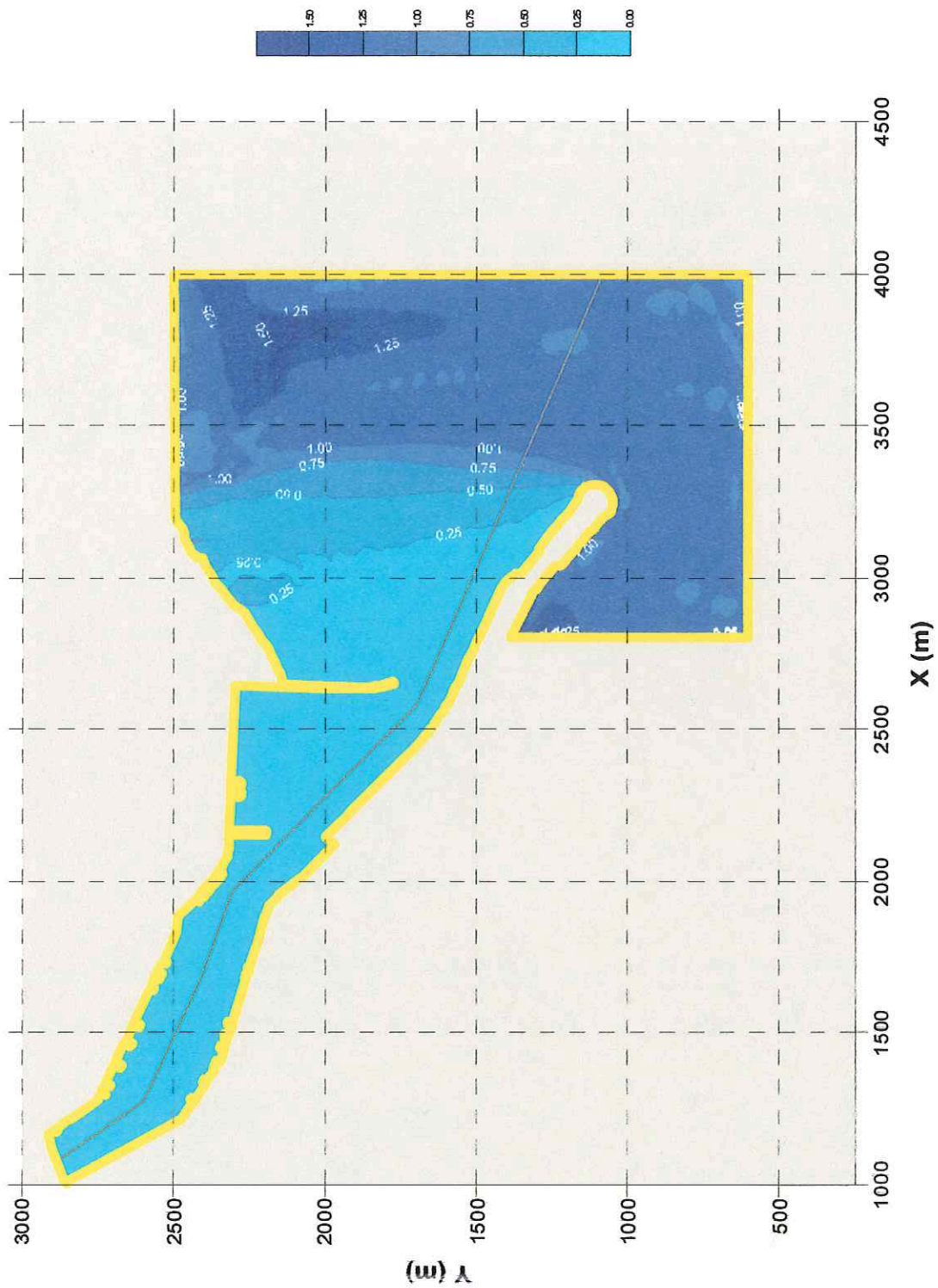


Figura 8. Escollera Prolongada Dir S - NM = 3.20 m - T = 15 s

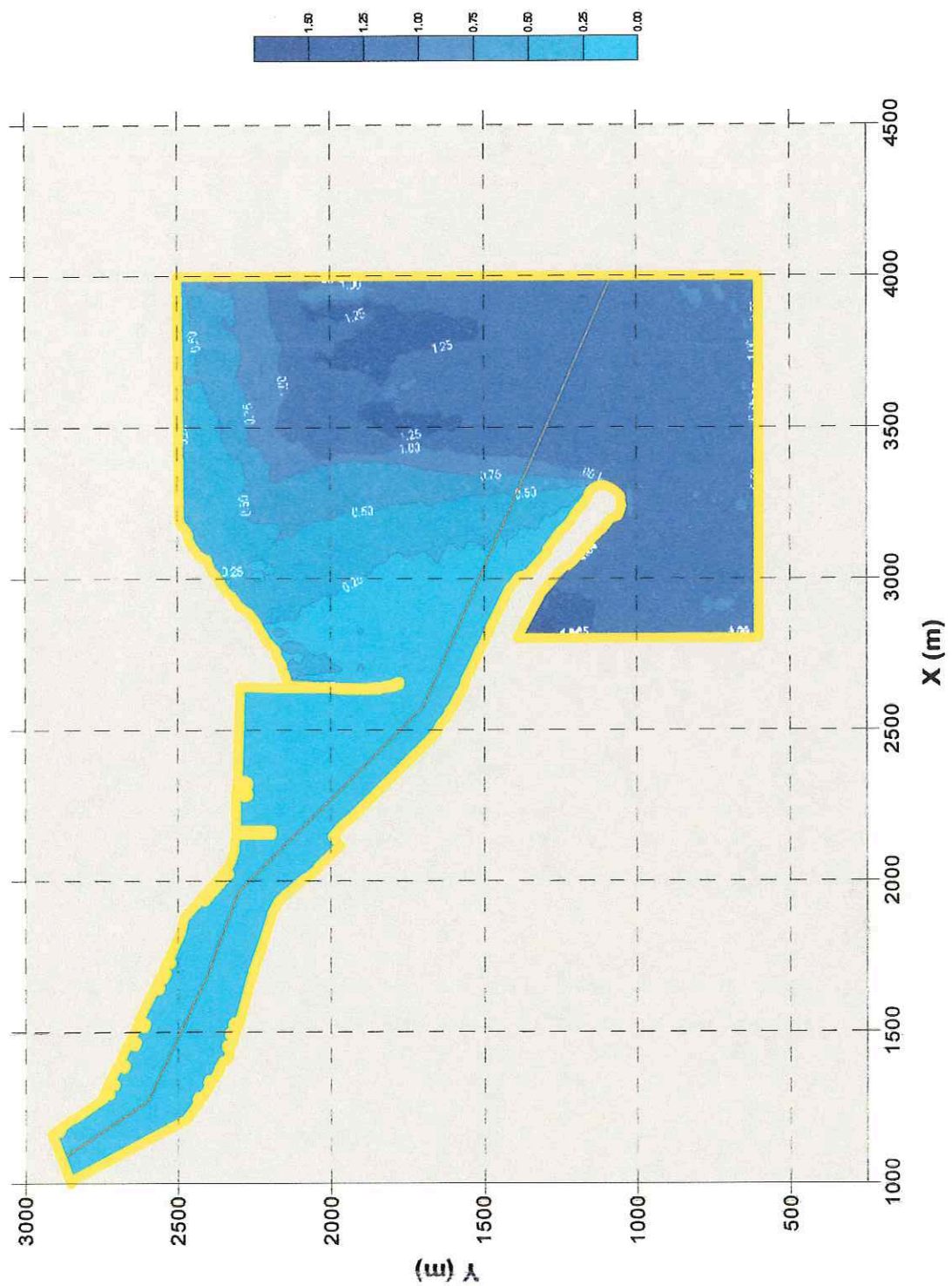


Figura 9. Escollera Prolongada Dir S - NM = 0.00 m - T= 15 s

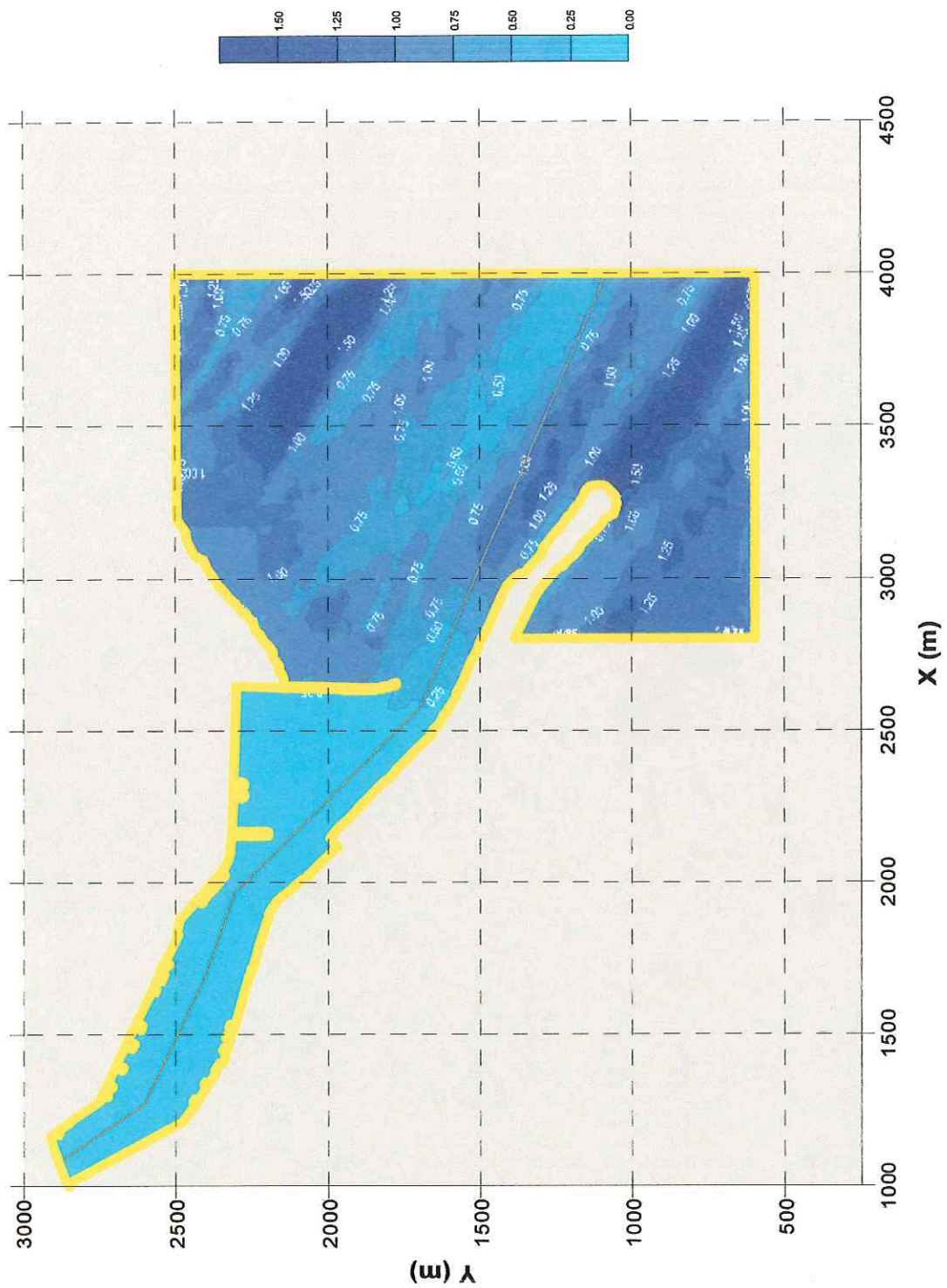


Figura 10. Escollera Prolongada Dir SE - NM = 3.20 m - T= 12 s

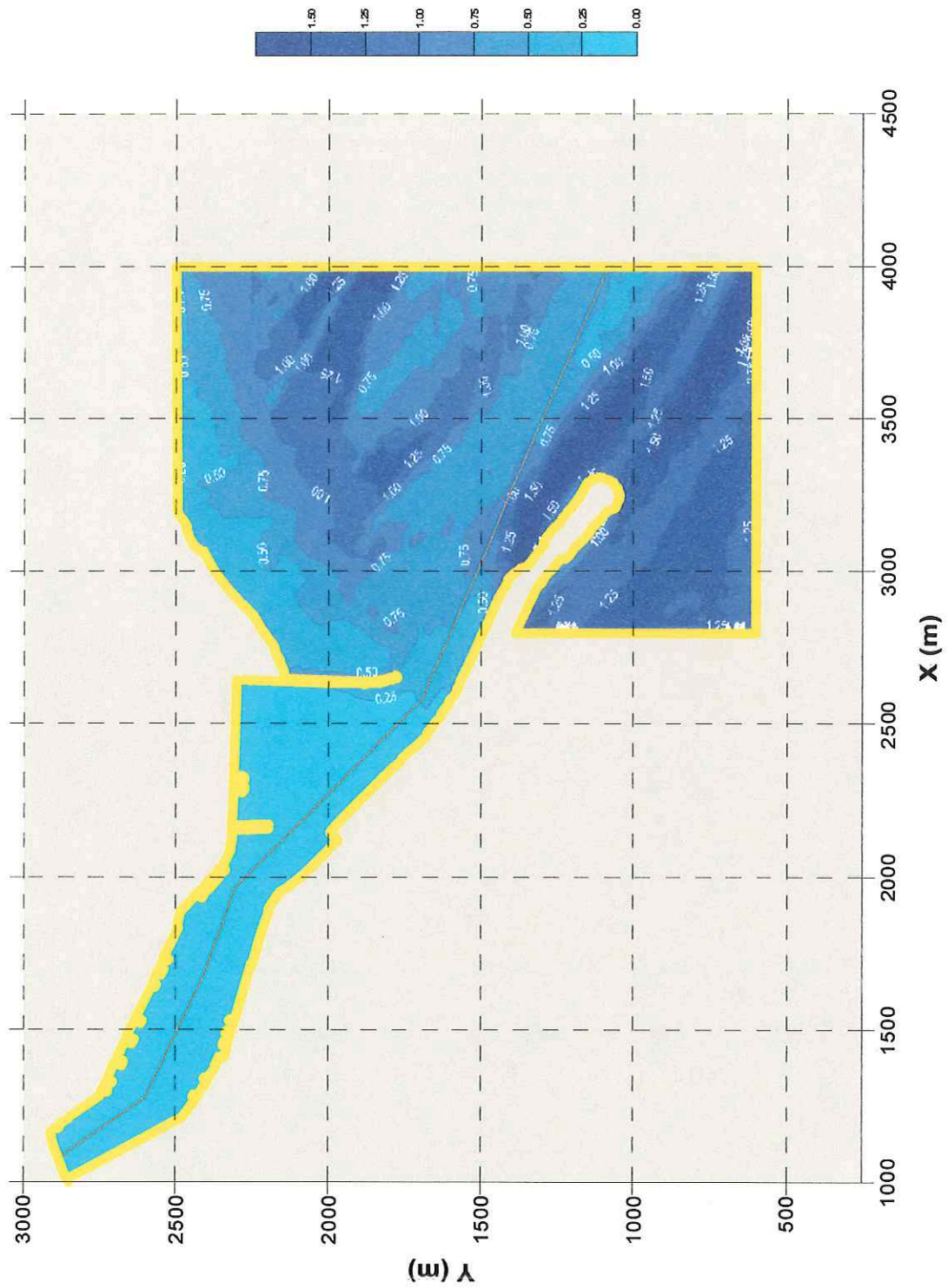


Figura 11. Escollera Prolongada Dir SE - NM = 0.00 m - T= 12 s

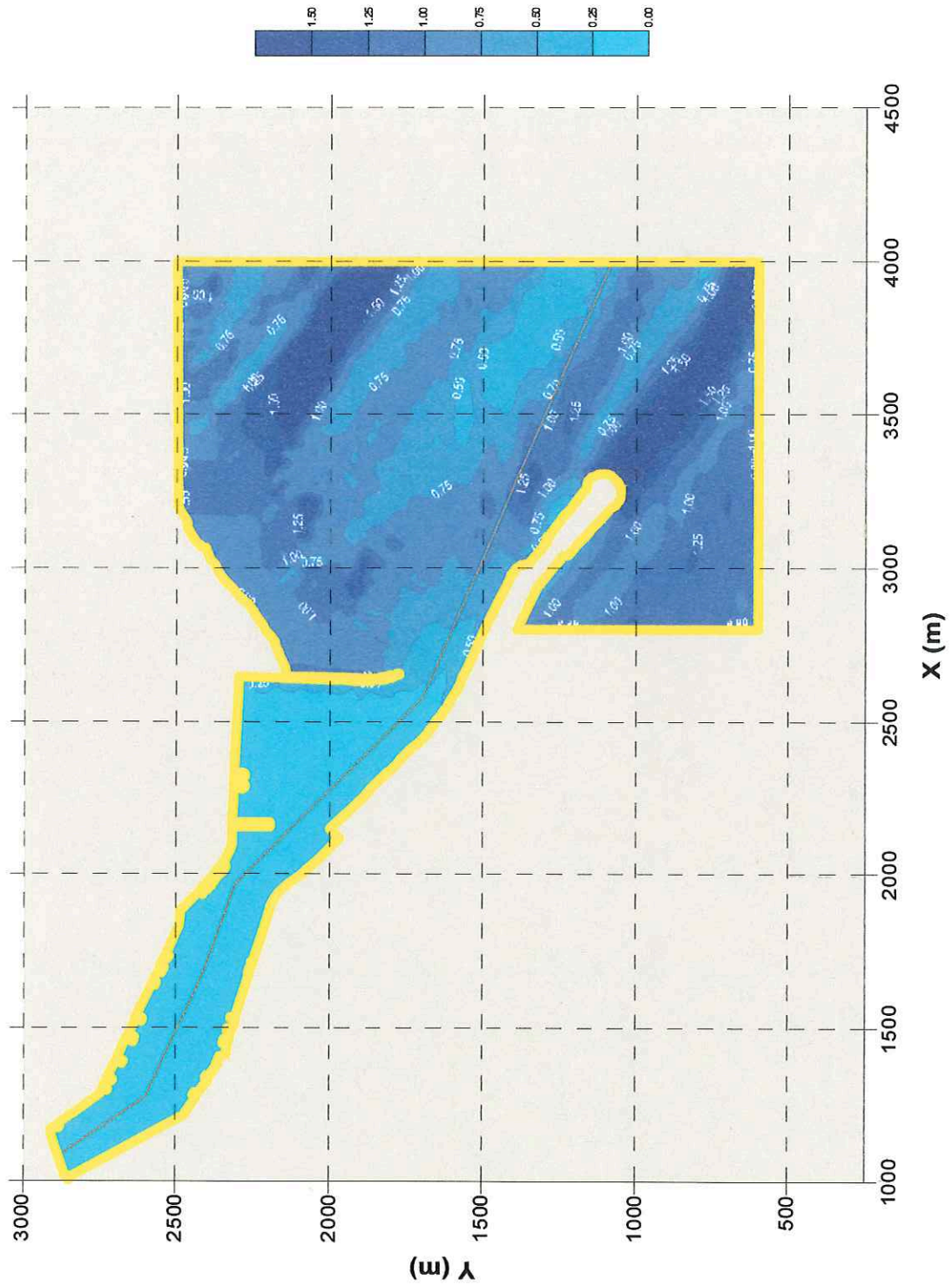


Figura 12. Escollera Prolongada Dir SE - NM = 3.20 m - T = 15 s

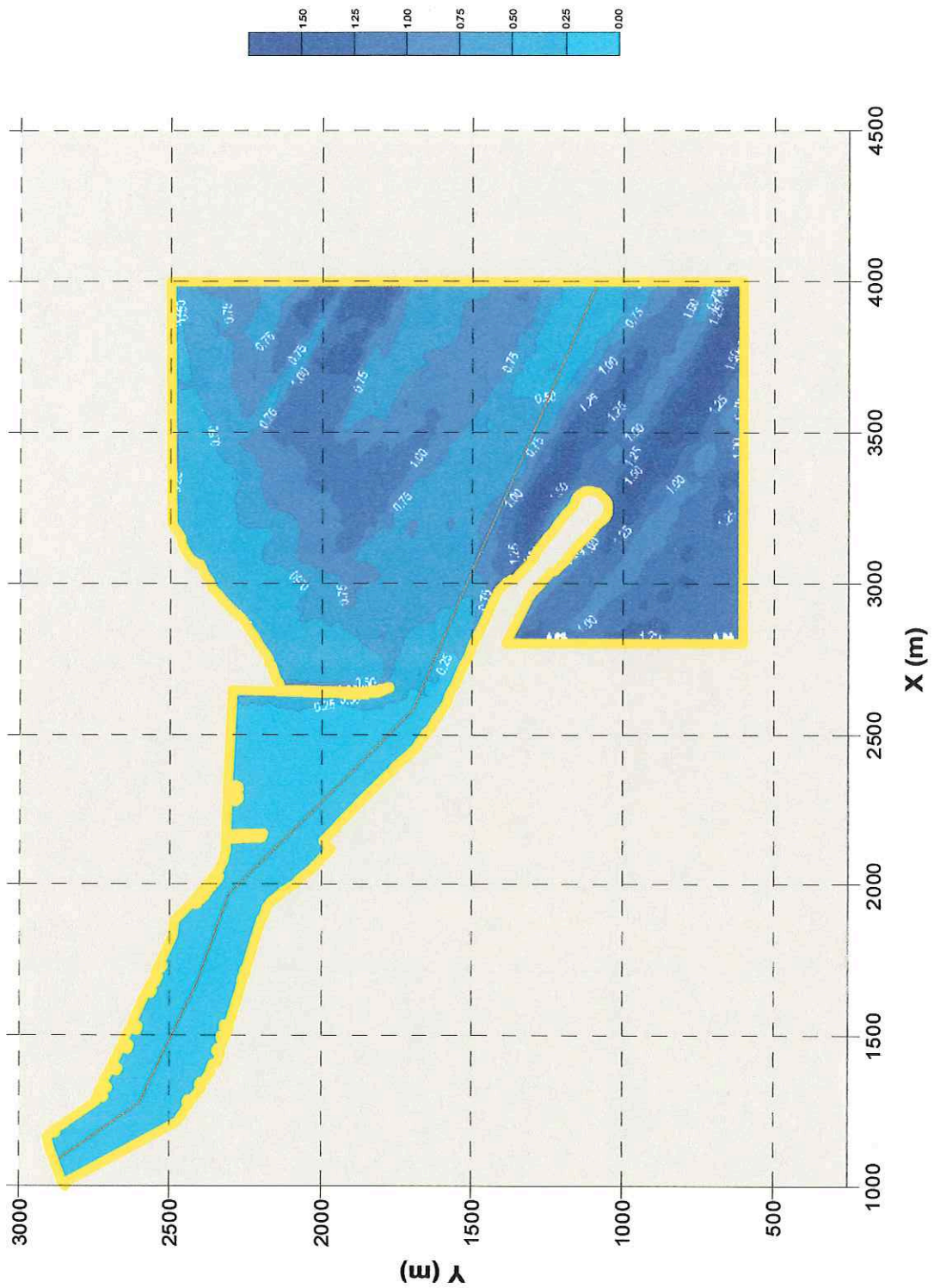


Figura 13. Escollera Prolongada Dir SE - NM = 0.00 m - T= 15 s

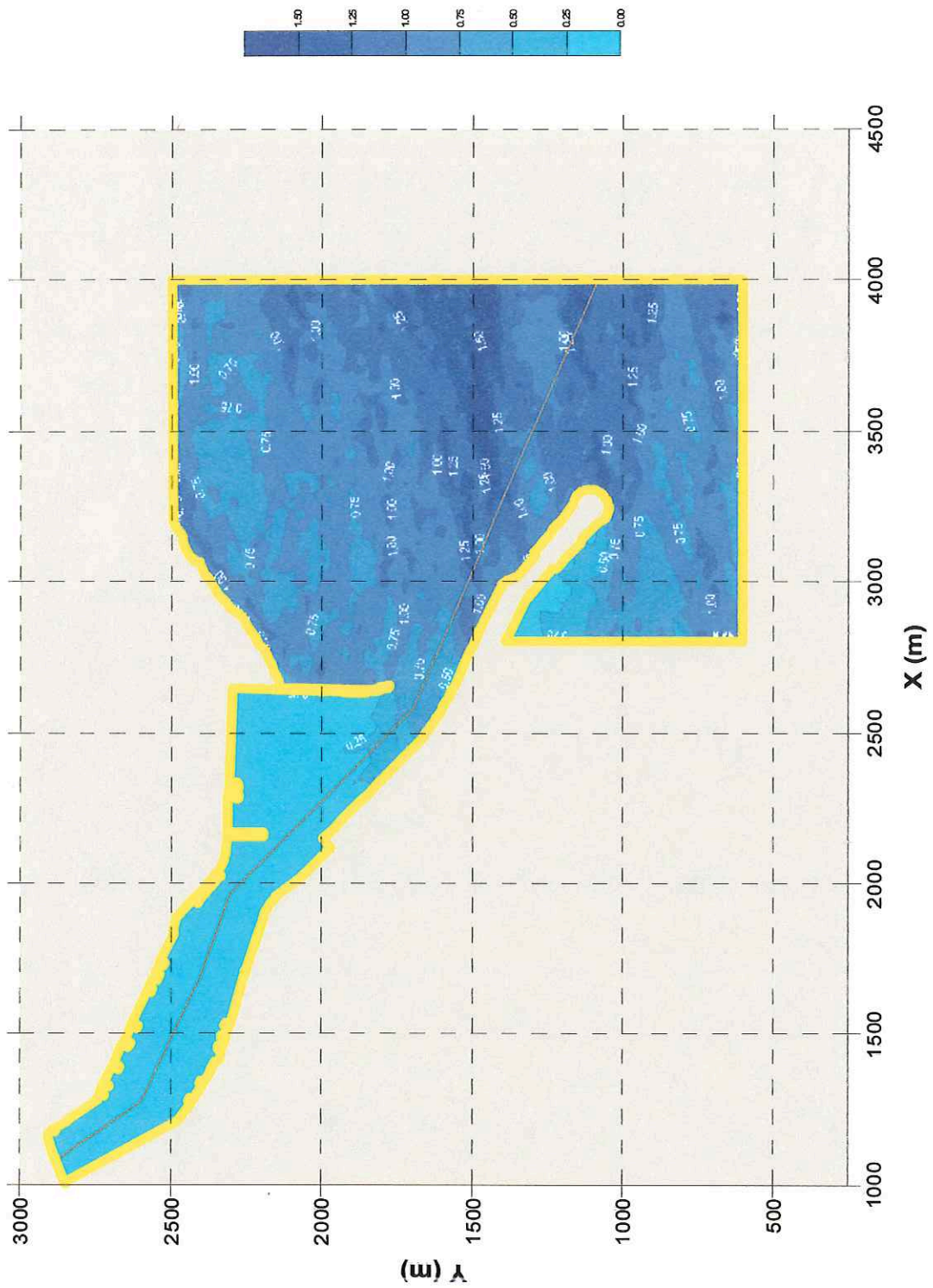


Figura 14. Escollera Prolongada Dir E - NM = 3.20 m - T = 6 s

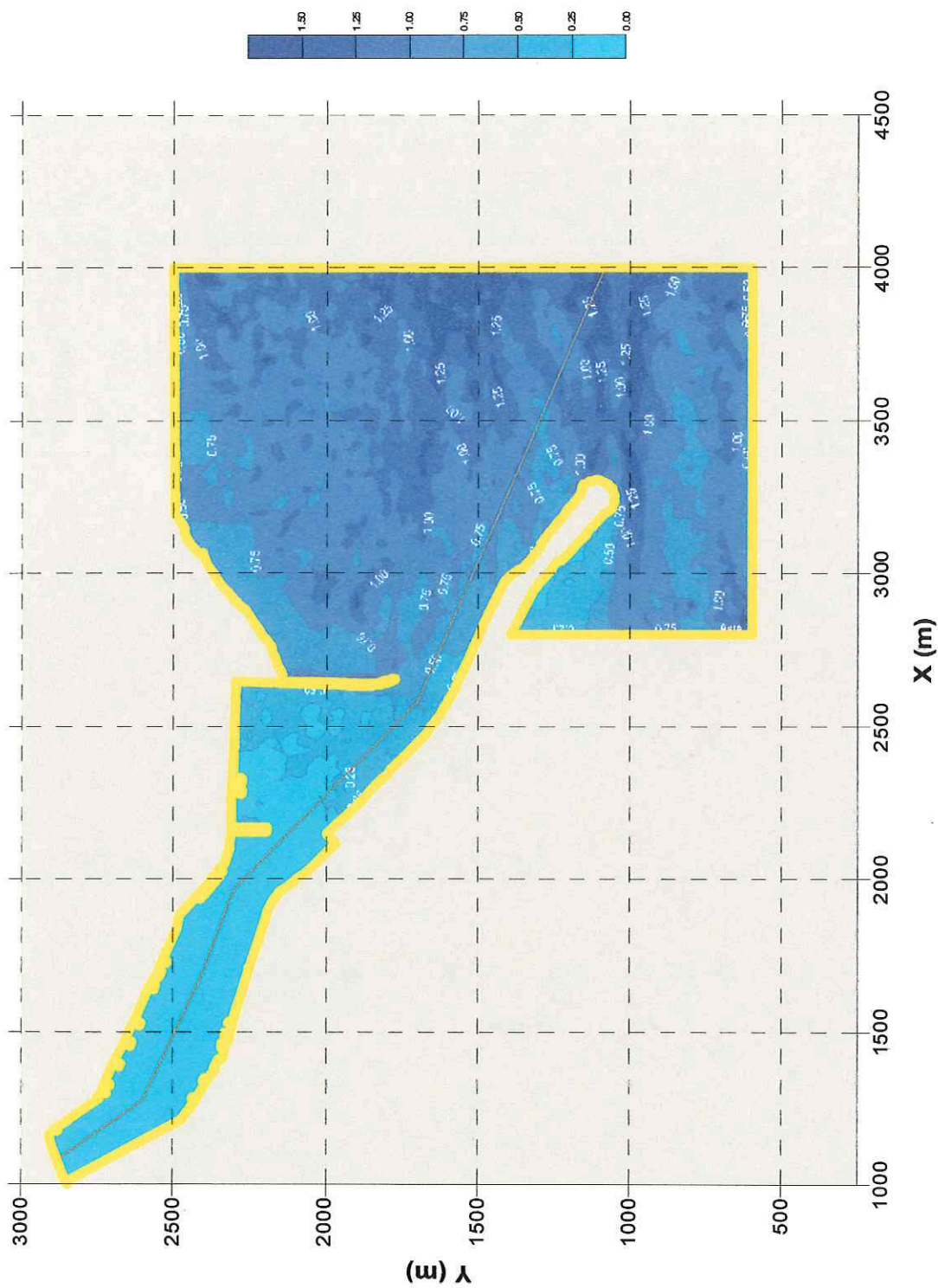


Figura 15. Escollera Prolongada Dir E - NM = 0.00 m - T= 6 s

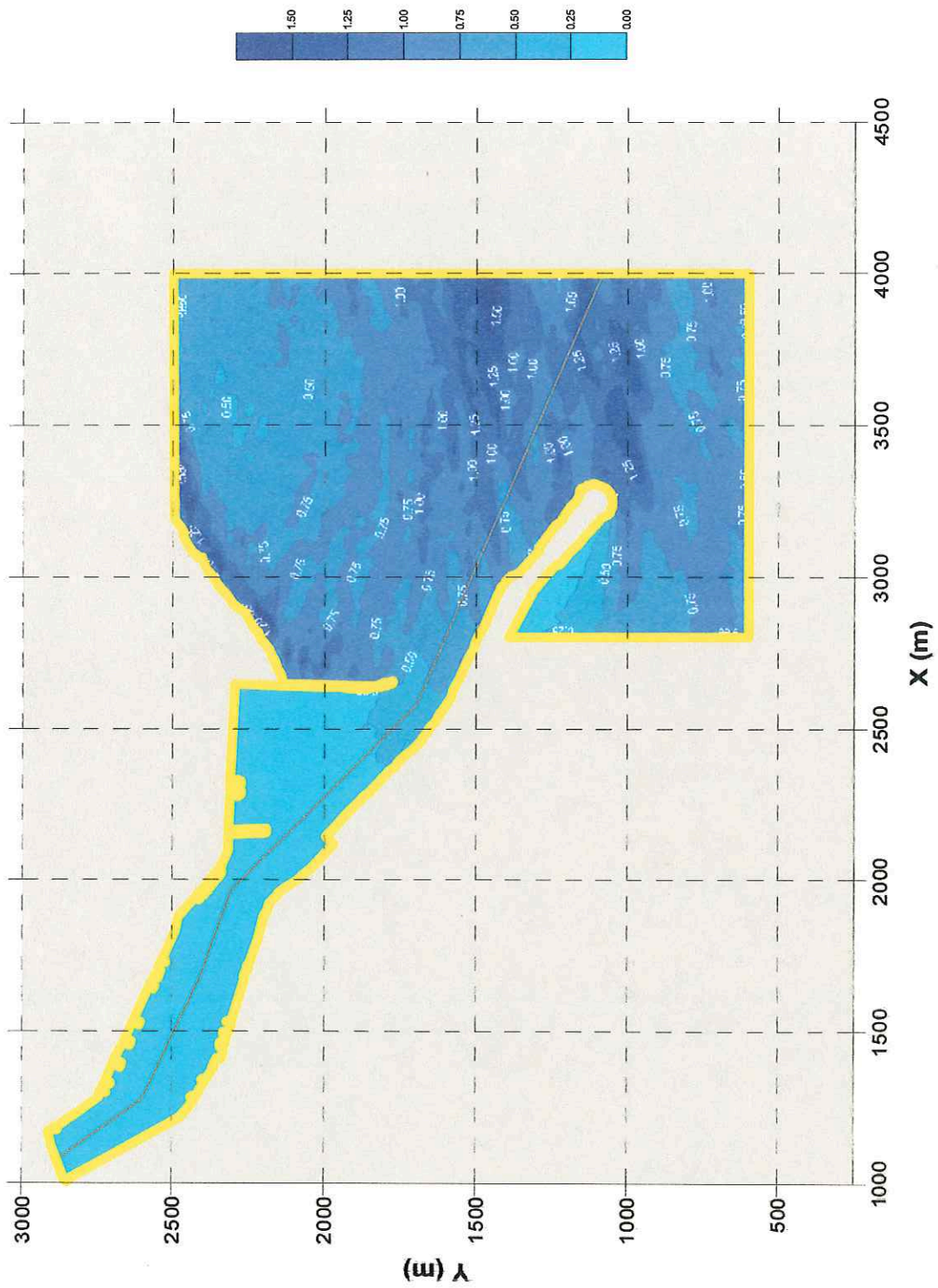


Figura 16. Escollera Prolongada Dir E - NM = 3.20 m - T= 8 s

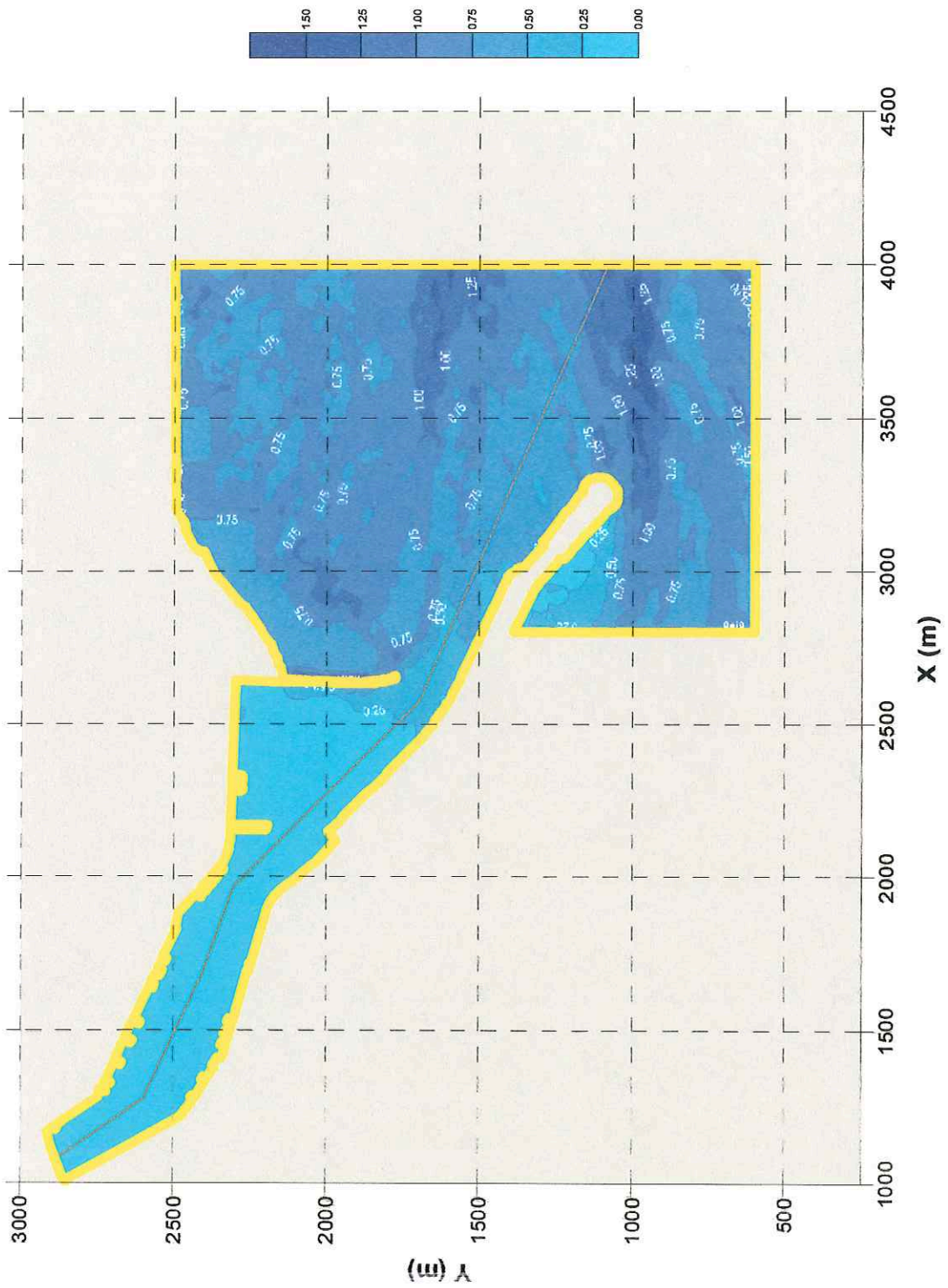


Figura 17. Escollera Prolongada Dir E - NM = 0.00 m - T= 8 s

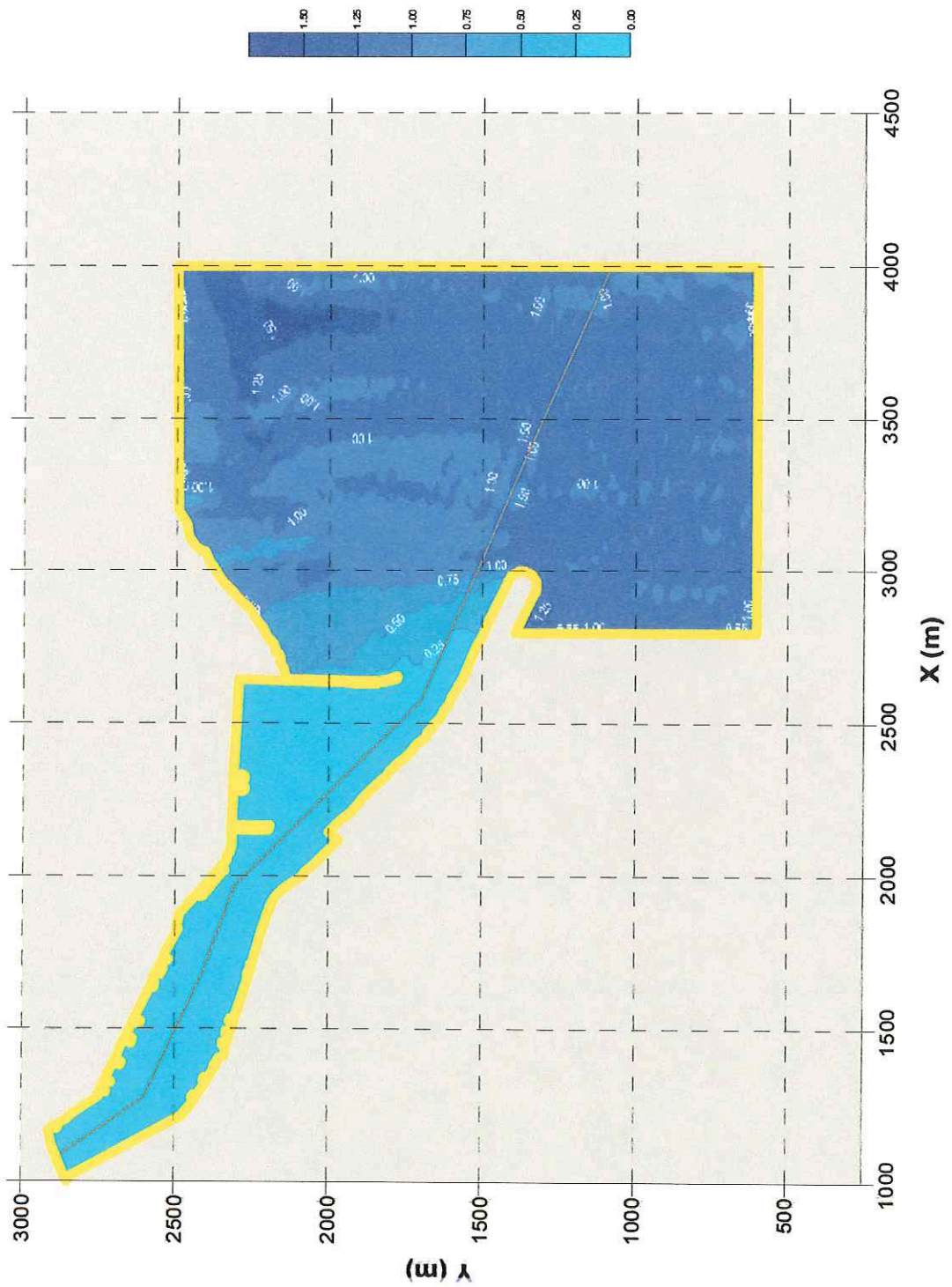


Figura 18. Escollera Actual Dir S - NM = 3.20 m - T= 12 s

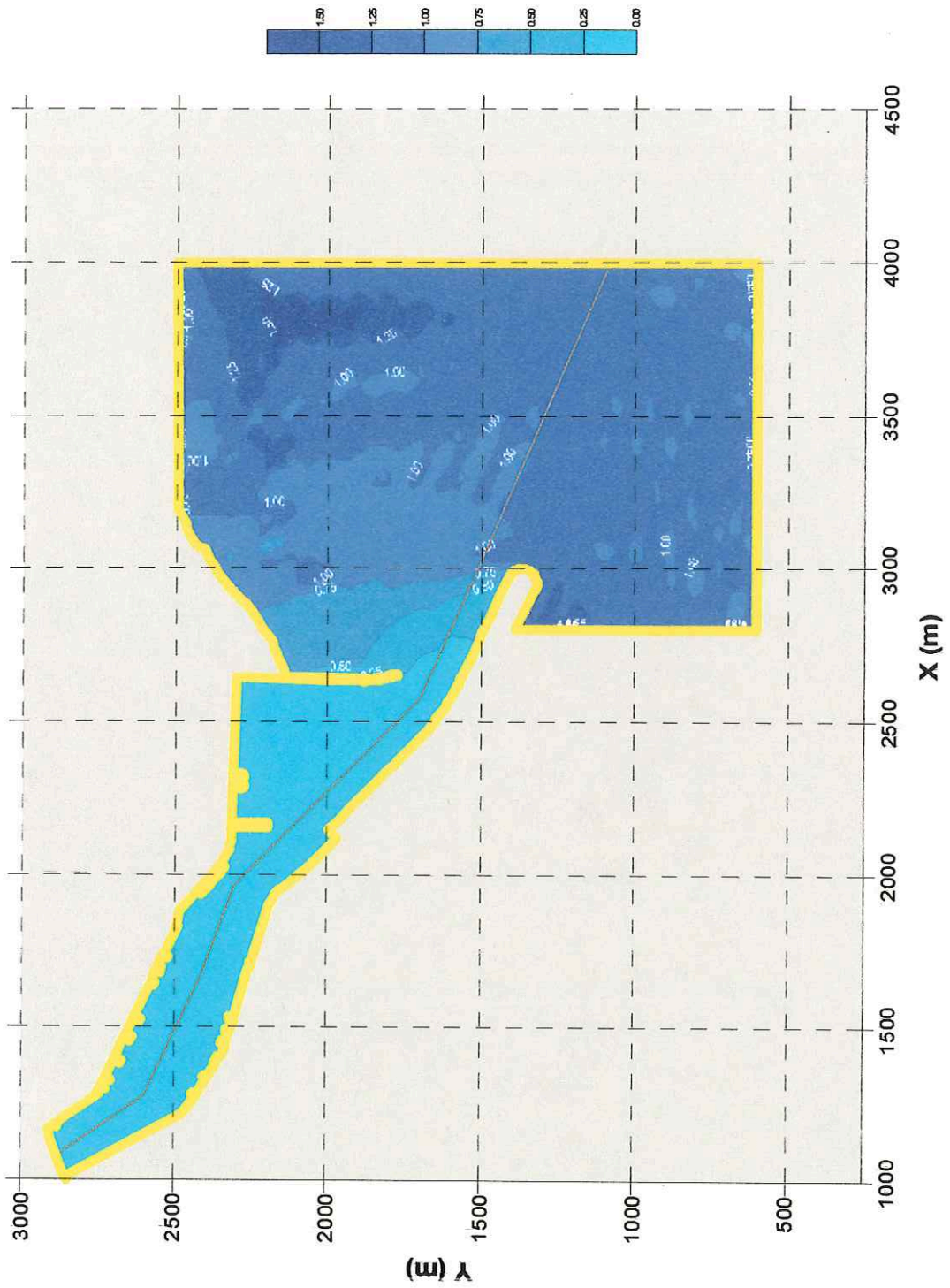


Figura 19. Escollera Actual Dir S - NM = 3.20 m - T= 15 s

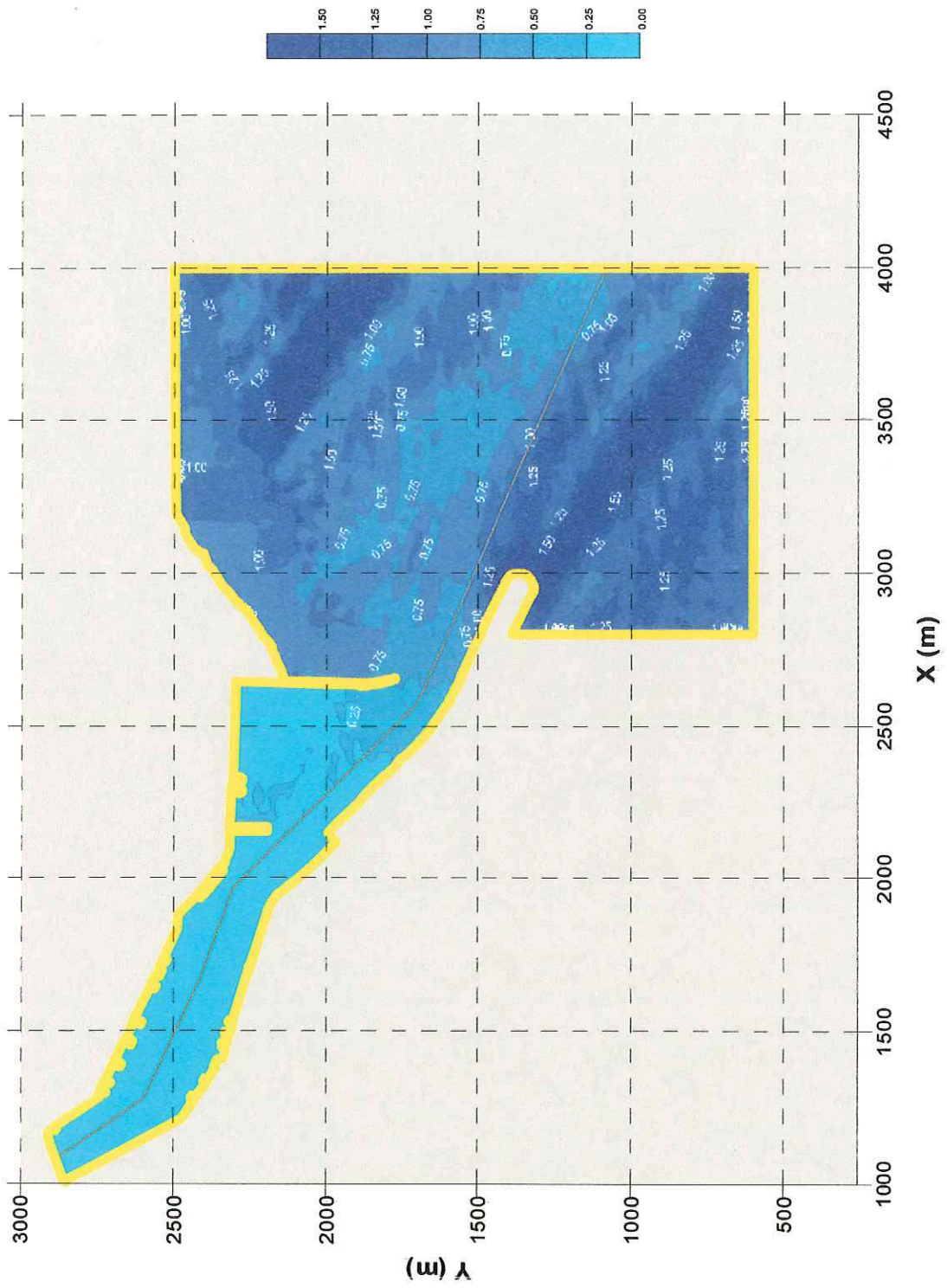


Figura 20. Escollera Actual Dir SE - NM = 3.20 m - T= 12 s

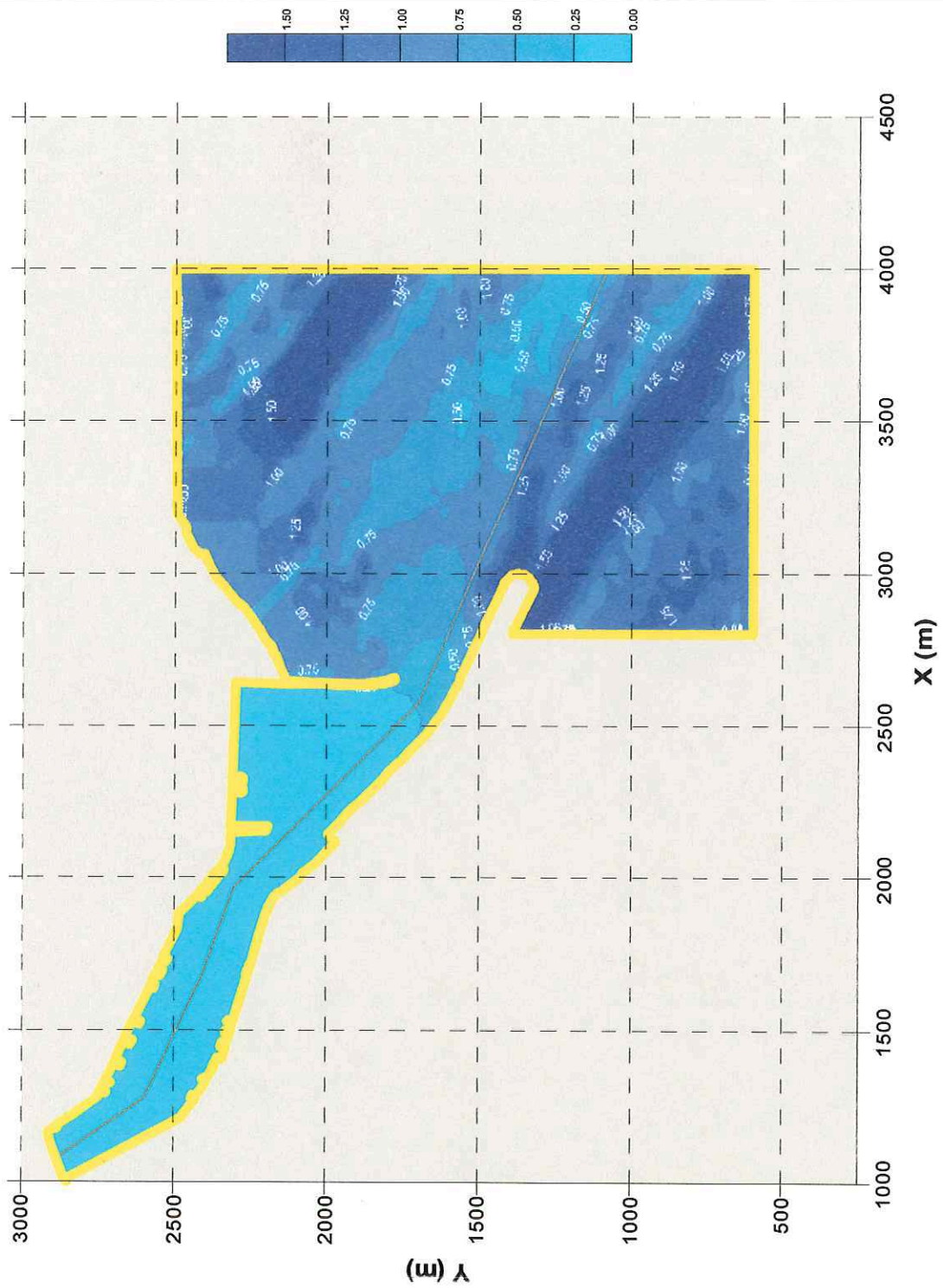


Figura 21. Escollera Actual Dir SE - NM = 3.20 m - T= 15 s

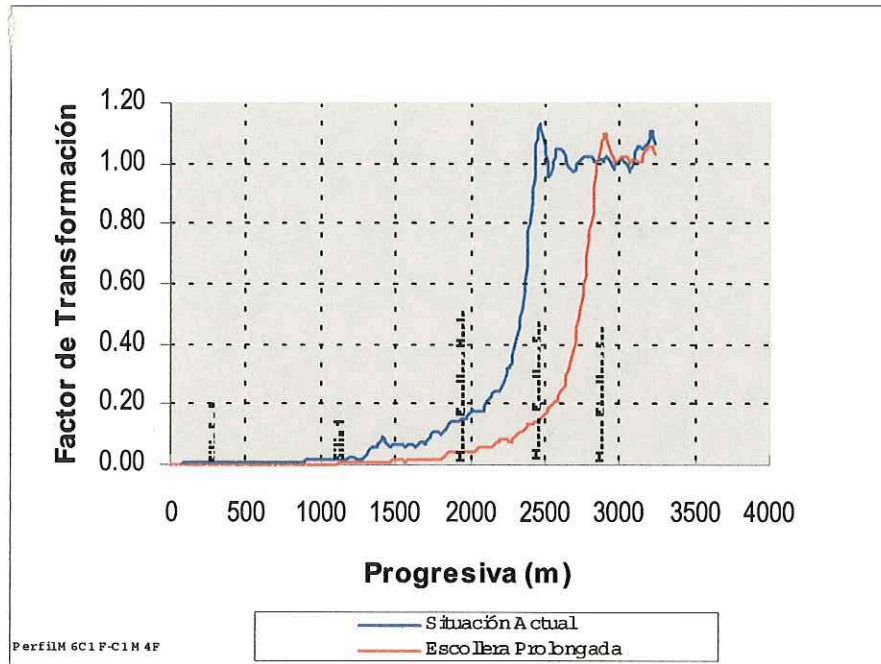
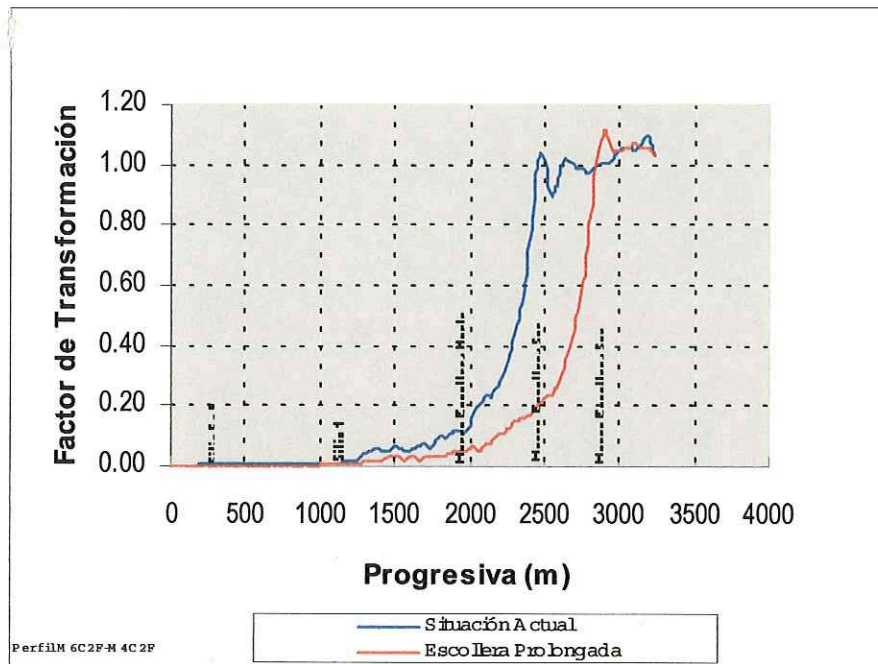


FIGURA 22 - Perfil Comparativo – Dirección Sur – NM = 3,20 m – T = 12 s



**FIGURA 23** – Perfil Comparativo – Dir Sur – NM = 3,20 m – T = 15 s

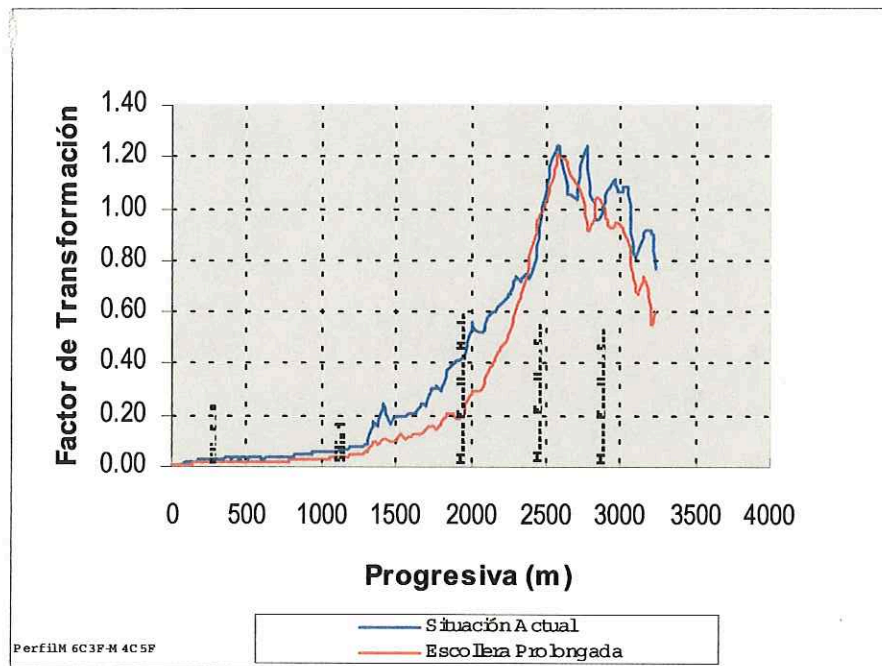
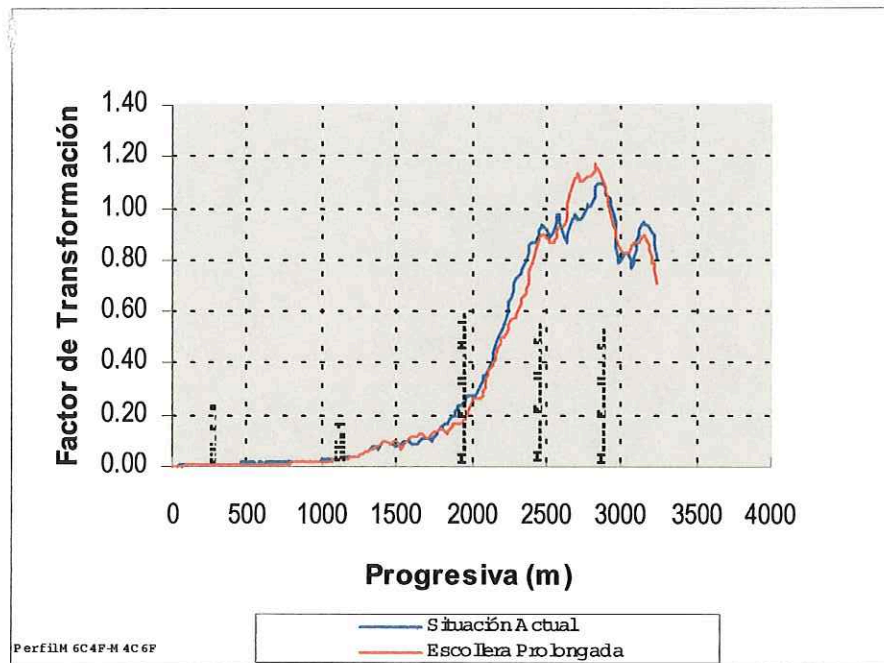


FIGURA 24 – Perfil Comparativo – Dir SE – NM = 3,20 m – T = 12 s



**FIGURA 25** – Perfil Comparativo – Dir SE – NM = 3,20 m – T = 15 s

# ANEXO I

# ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE AGITACION POR OLEAJE EN UN PUERTO MEDIANTE SIMULACION NUMERICA

MIGUEL A. CAVALIERE  
ANGEL N. MENENDEZ  
y  
ROBERTO CASTELLANO

*Laboratorio de Hidráulica Aplicada - I.N.C. y T.H.,  
Casilla de Correo 21, 1802 Aeropuerto de Ezeiza,  
Argentina.*

## RESUMEN

Se describe una aplicación del sistema computacional DIFRAC para estudiar las condiciones de agitación por oleaje dentro de un puerto, teniendo en cuenta el efecto combinado de difracción, refracción y reflexión de las olas. Se presentan resultados para la amplitud y dirección de propagación del oleaje en su interior y de las condiciones de resonancia en las distintas dársenas del puerto.

## SUMMARY

An application of the computational model DIFRAC for the study of wave conditions inside a harbor is described. It takes account of the combined effect of diffraction, refraction and reflection of waves. Results for wave amplitude and wave front propagation direction into the harbor are presented, together with an analysis of resonance conditions for the different docks.

## INTRODUCCION

Un puerto constituye un área de aguas calmas no sólo para garantizar la permanencia en amarra de las embarcaciones bajo adecuadas condiciones de seguridad, sino además para permitir las operaciones que éstas deban realizar: embarque de pasajeros, manipuleo de cargas, abastecimiento, reparación, mantenimiento, etc.

En zonas expuestas a la acción del oleaje, es habitual que se deba recurrir a la construcción de estructuras de protección que limiten su penetración al puerto. Las dimensiones y orientación del acceso al puerto surgen de una solución de compromiso entre las facilidades requeridas por las embarcaciones para acceder al puerto y la energía de oleaje máxima admisible dentro del espejo de agua protegido. La construcción de

Recibido: Noviembre 1991

estas estructuras (obras de abrigo) tiene, habitualmente, una importante incidencia en el costo total del puerto, afectando la rentabilidad en el caso de tratarse de un puerto comercial. Proteger en exceso supone inversiones iniciales innecesariamente altas; por el contrario, proteger en defecto significa costos operativos elevados.

Para la depuración de un proyecto portuario, específicamente en lo que se refiere a protección del oleaje, el ingeniero hidráulico ha recurrido tradicionalmente a los modelos hidráulicos, es decir, a la simulación física del problema en escala reducida. Mediante esta técnica el ingeniero proyectista tiene la posibilidad de "ver" cómo las obras interactúan con el oleaje, facilitándole la interpretación de la compleja hidrodinámica, originada en la coexistencia de los fenómenos de difracción, refracción y reflexión, y la formulación de diagnósticos y propuestas de soluciones. La principal dificultad con la simulación física es su alto costo en infraestructura (superficies cubiertas del orden de 500 a 1000 m<sup>2</sup>, equipo para generación de olas, instrumentación electrónica específica para la adquisición de datos), implementación (costo de construcción) y operación (energía eléctrica, personal auxiliar). Además, para escalas del orden de 1:150 a 1:200 los efectos de escala comienzan a distorsionar los resultados.

Estos inconvenientes, sumados a la reciente formulación de modelos teóricos confiables de agitación por oleaje, el persistente incremento de la potencia de cálculo de las computadoras, a costos cada vez menores, y los avances en los métodos de resolución numérica de ecuaciones diferenciales y de las técnicas de visualización de resultados, han colocado a la simulación numérica en una posición ventajosa tanto desde el punto de vista técnico como económico.

En este trabajo se presenta un estudio de las condiciones de agitación por oleaje en un puerto deportivo a construirse en Punta del Este (Uruguay). El objetivo es ilustrar el alcance de este tipo de modelos desde un punto de vista práctico.

## MODELO NUMERICO

El estudio se realizó con el sistema computacional DIFRAC, desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica Aplicada (LHA) del INCYTH. Este modelo permite simular el efecto combinado de refracción, difracción y reflexión de olas, tal como se presenta en los recintos portuarios. Sus detalles técnicos ya han sido expuestos en oportunidades anteriores<sup>1,2</sup>. En lo que sigue se presenta sólo una breve reseña.

La formulación matemática del problema de agitación se basa en la teoría lineal de ondas de pequeña amplitud de tipo armónico y en la hipótesis de que la pendiente del fondo es suave<sup>3</sup>. Bajo esas condiciones, el potencial (complejo) plano de velocidades  $\Phi$ , reducido al nivel medio del agua, satisface la ecuación

$$\nabla \cdot (\alpha \nabla \Phi) + \mathcal{K}^2 \alpha \Phi = 0 \quad (1)$$

donde  $\alpha$  es el producto de las celeridades de fase y de grupo y  $\mathcal{K}$  un coeficiente de modulación vertical de la amplitud de oscilación, relacionado a la frecuencia mediante una relación de dispersión.

La amplitud  $A$  del oleaje puede calcularse a partir del potencial plano reducido a través de la siguiente expresión:

$$A = \frac{\omega}{g} |\Phi| \quad (2)$$

donde  $\omega$  es la pulsación de la ola y  $g$  la aceleración de la gravedad.

La ecuación (1), conocida como Ecuación de Berkhoff, ha sido exhaustivamente verificada en su capacidad de simular adecuadamente el fenómeno de agitación<sup>2,4</sup>. En particular, Booij<sup>5</sup> analizó su comportamiento en problemas con pendientes relativamente fuertes, comparando sus resultados con un modelo tridimensional, y obtuvo acuerdos satisfactorios a pesar de apartarse de una de las hipótesis básicas de la formulación.

Los contornos físicos del recinto portuario pueden comportarse como totalmente reflejantes o parcialmente absorbentes. Estos últimos representan estructuras en las cuales hay disipación de energía, tales como rompeolas, escolleras de enrocado, etc.

El puerto se comunica, a través de su entrada, con el mar, que constituye un dominio "infinito" donde se superponen el oleaje incidente y el de "scattering", resultante de la acción reflejante y difractante del conjunto de estructuras que componen el puerto. El potencial de "scattering" debe satisfacer la condición de radiación de Sommerfeld.

Con vistas a su resolución numérica, el dominio del problema es dividido en una región interior finita, donde se concentran todos los contornos físicos relevantes, y una región exterior infinita. En la primera es posible reemplazar la formulación diferencial por una variacional. Para la región exterior, en cambio, puede adoptarse una formulación integral indirecta en términos de una distribución de fuentes, lo cual trae como ventaja la posibilidad de resolver el problema exterior sólo sobre el contorno matemático de separación de ambas regiones, denominado frontera de radiación.

En base a esta reformulación del problema, es natural adoptar el método de los elementos finitos para la zona interior y el método de los elementos de contorno para la zona exterior.

## DESCRIPCION DEL PUERTO

El proyecto estudiado corresponde a una marina a construirse, sobre el litoral atlántico de la República Oriental del Uruguay, destinada al amarre de embarcaciones deportivas. Este estudio fue efectuado por la LHA a requerimiento de la consultora LATINOCONSULT S.A.<sup>6</sup>.

En la Figura 1 se presenta un esquema del puerto y se identifican distintas zonas. El acceso desde el mar se logra a través de un canal de navegación de aproximadamente 300 metros de longitud, a cuyos lados se desarrollan dos escolleras de enrocado. La distribución general de las zonas de amarra es de tipo ramificada, distinguiéndose cuatro dársenas (A,B,C,D) y dos canales (zonas E a I). La profundidad en toda la marina es constante, salvo en el canal de acceso. La sección transversal del canal es de tipo trapezoidal, con taludes laterales suaves.

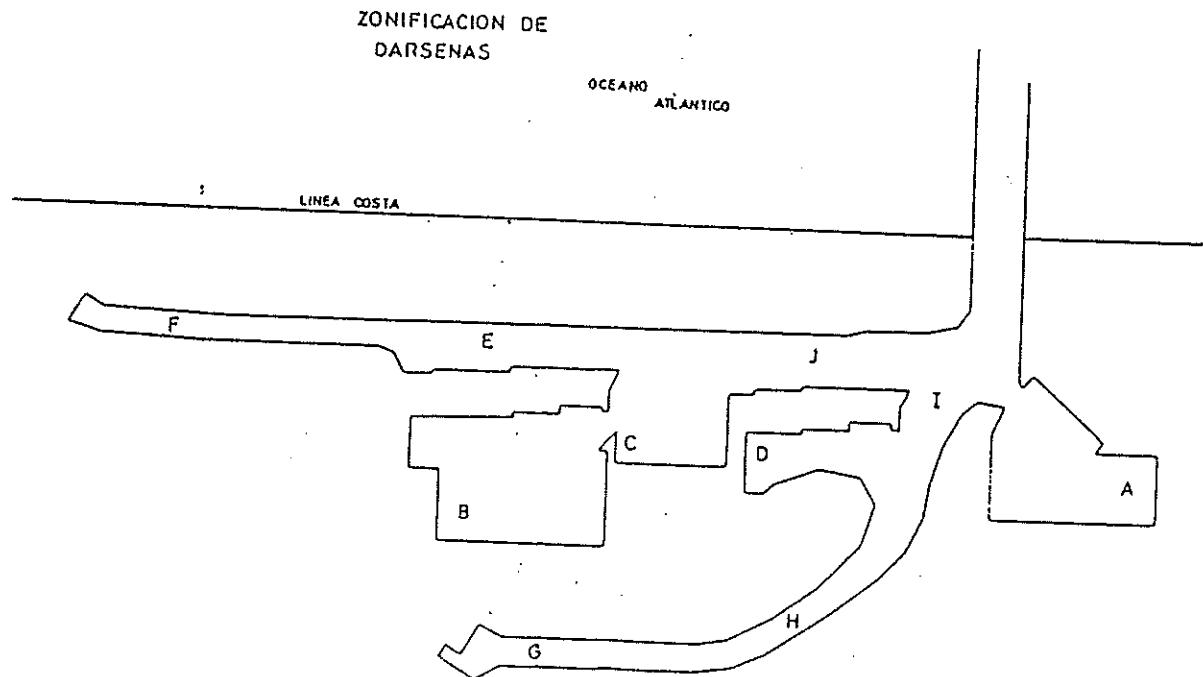


Figura 1. Esquema del puerto.

### IMPLEMENTACION DEL MODELO

La frontera de radiación, que separa las zonas interior y exterior, se ubicó en la boca del canal de acceso, uniendo a las dos escolleras. La mayor parte de las paredes internas de la marina están constituidas por un tablestacado vertical que, desde el punto de vista hidrodinámico, constituye un contorno impermeable sobre el cual el oleaje se refleja totalmente. El tratamiento de estos contornos resultó, entonces, trivial dado que constituyen una condición de borde de tipo natural. Las escolleras y las zonas protegidas con taludes inclinados se trataron como contornos parcialmente absorbentes, con coeficientes de absorción determinados por el proyectista de la obra.

La malla de elementos finitos, mostrada en la Figura 2, fue generada en forma automática, a partir de la planimetría del contorno del puerto, utilizando el programa ENREDO, desarrollado por el grupo de Mecánica Computacional del Centro Atómico de Bariloche de la CNEA. Para lograr una adecuada representación numérica del problema, fue necesario trabajar con una malla de 13657 elementos y 7411 nodos, con lo cual las longitudes de onda más cortas estudiadas fueron representadas, al menos, con 5 elementos. Teniendo en cuenta que el potencial plano  $\Phi$  es complejo el número de incógnitas se duplica. Esto significó un requerimiento de 7 MBytes de memoria para el almacenamiento de los datos y tiempos de máquina en MicroVax del orden de los 80 minutos de CPU por ensayo.

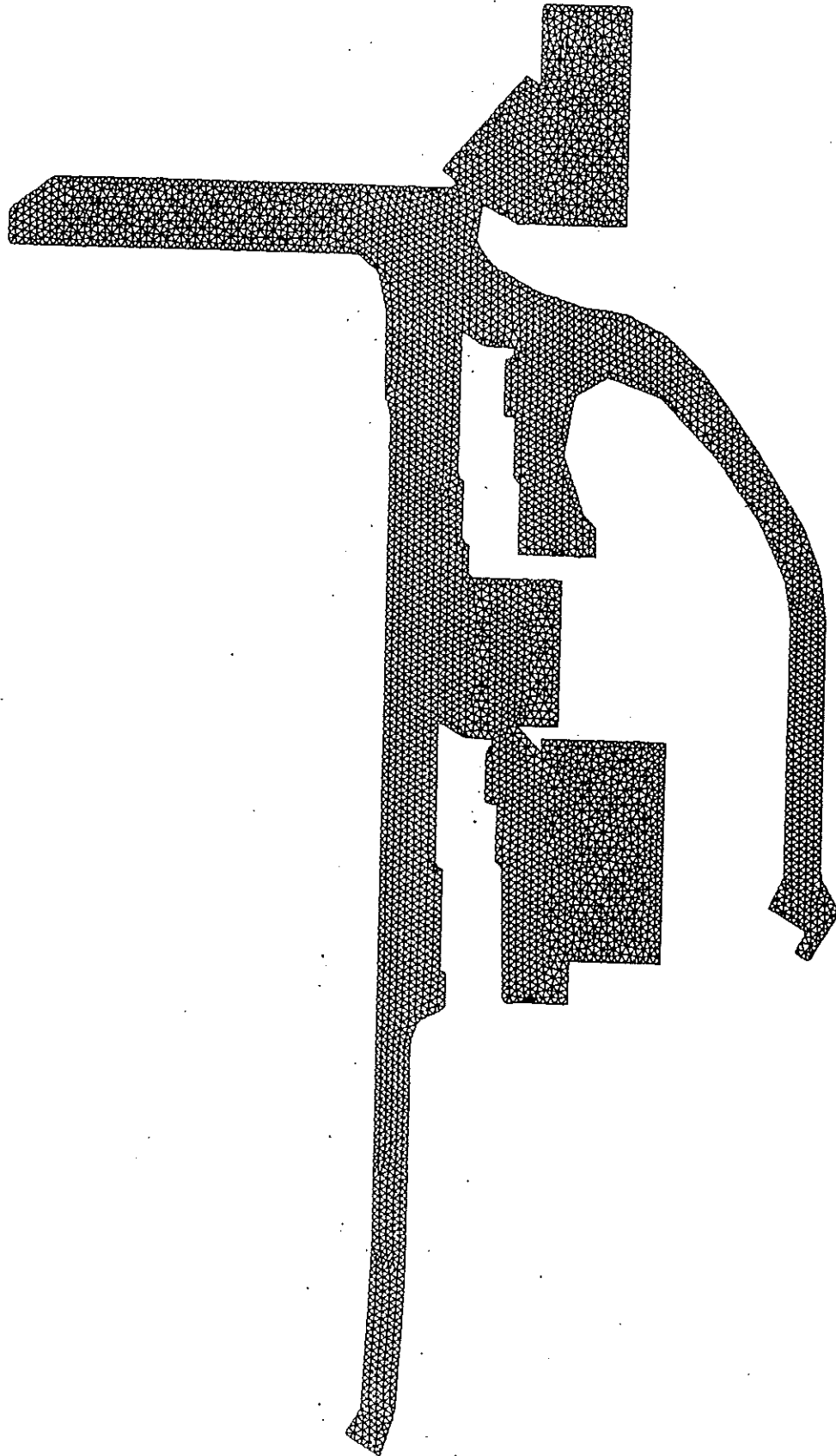


Figura 2. Malla de elementos finitos.

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Se efectuaron ensayos para diferentes condiciones del oleaje incidente, analizándose la efectividad de las estructuras de abrigo. En la Figura 3 se muestra una vista tridimensional de la superficie libre en la zona interior del puerto correspondiente a uno de los ensayos. Se observa que el nivel de agitación es marcadamente distinto en las diferentes dársenas.

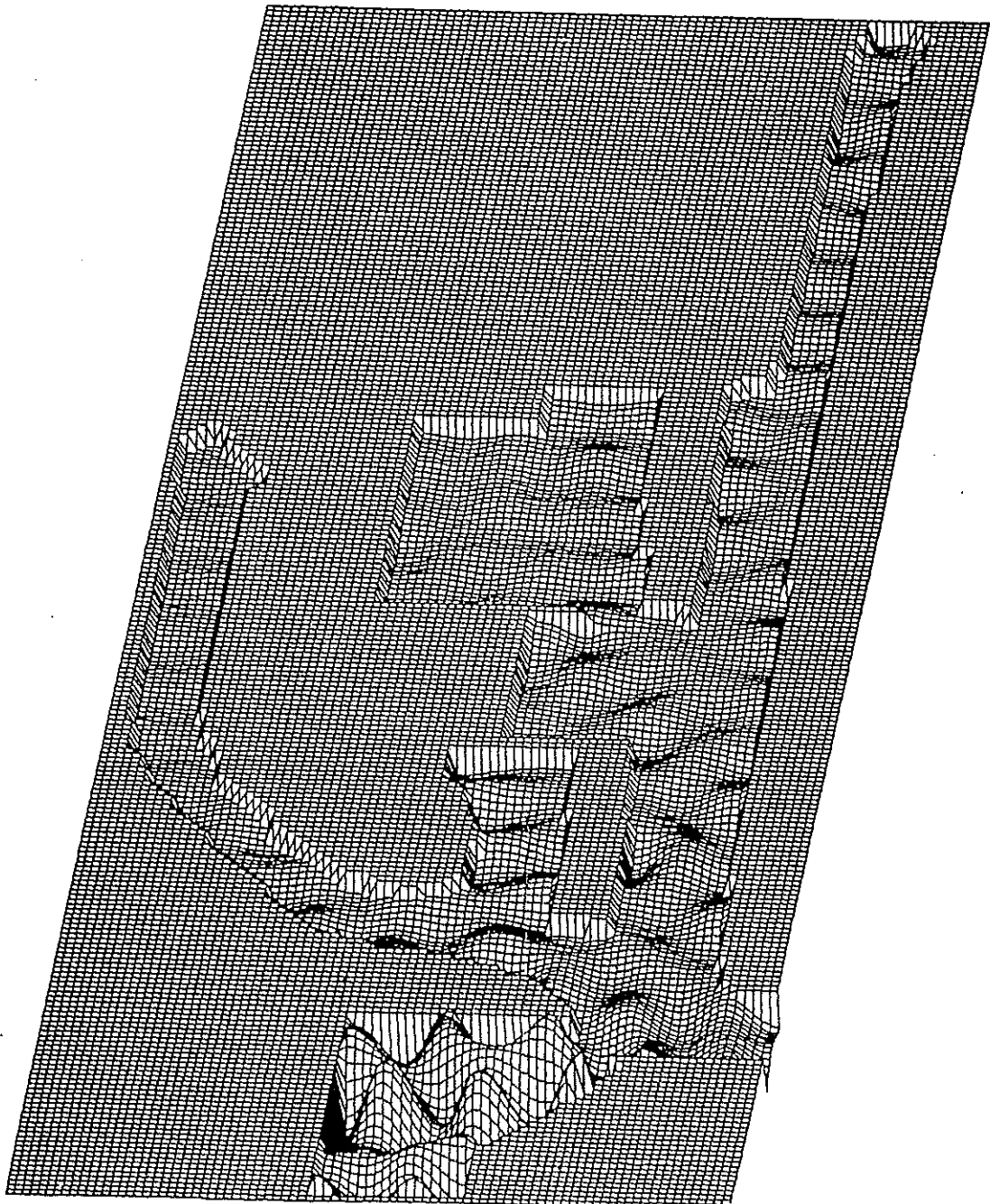


Figura 3. Vista tridimensional del interior del puerto.

En la Figura 4 se representa la amplitud del oleaje a lo largo del canal de acceso. Se observa que la atenuación es muy importante. Para olas con períodos comprendidos entre 5 y 7 segundos, que son las más frecuentes en esa región, la atenuación alcanza el 90 %, siendo algo más leve para períodos mayores. Se determinó que los taludes del canal de acceso juegan un rol muy importante en este proceso, dado que producen un efecto de refracción sobre las olas, orientándolas hacia las escolleras que protegen el canal, las cuales disipan gran parte de la energía de las olas incidentes.

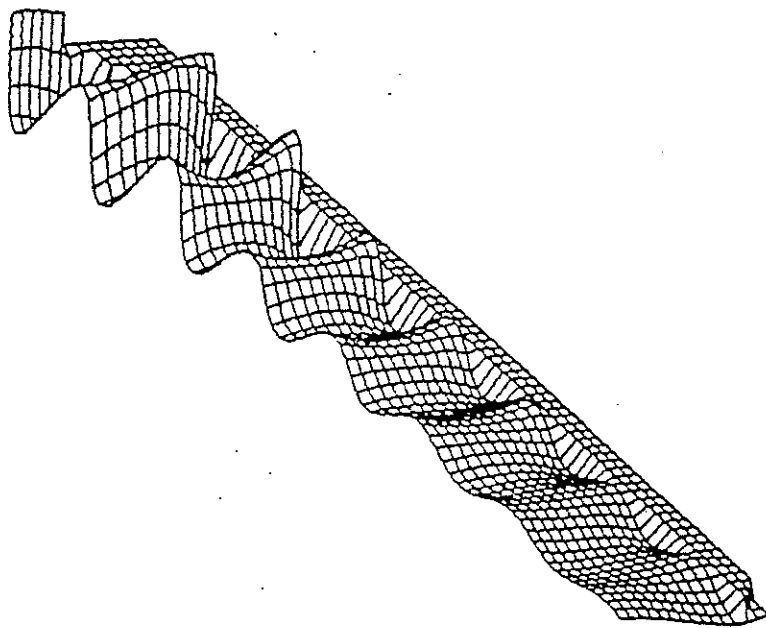


Figura 4. Atenuación del oleaje en el canal de acceso.

En la Figura 5 se presenta una vista tridimensional de detalle de la Dársena A, donde la agitación es mayor. La Figura 6 muestra las líneas de isoamplitud, relativa a la amplitud de la ola incidente, sobre todo el puerto. Dado que el modelo es de tipo lineal, estos resultados son independientes de la amplitud del oleaje incidente.

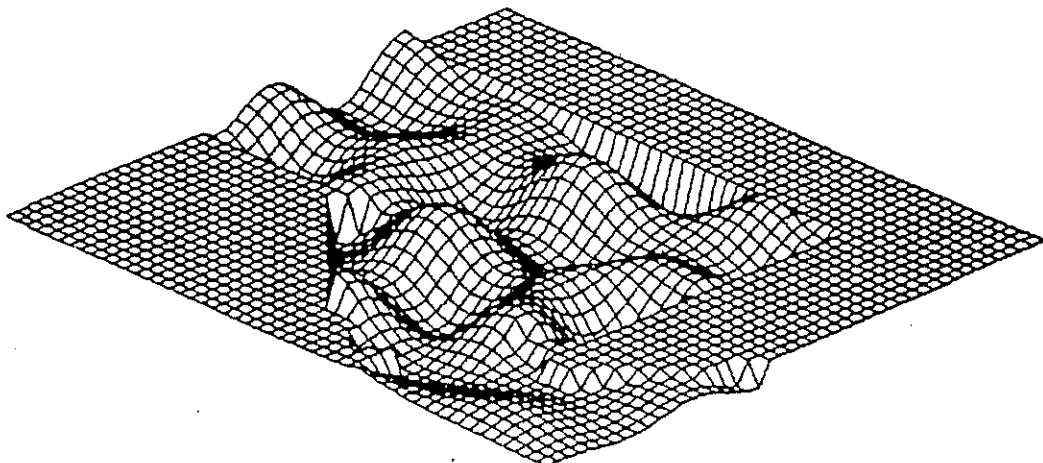


Figura 5. Vista tridimensional del oleaje en la Dársena A.

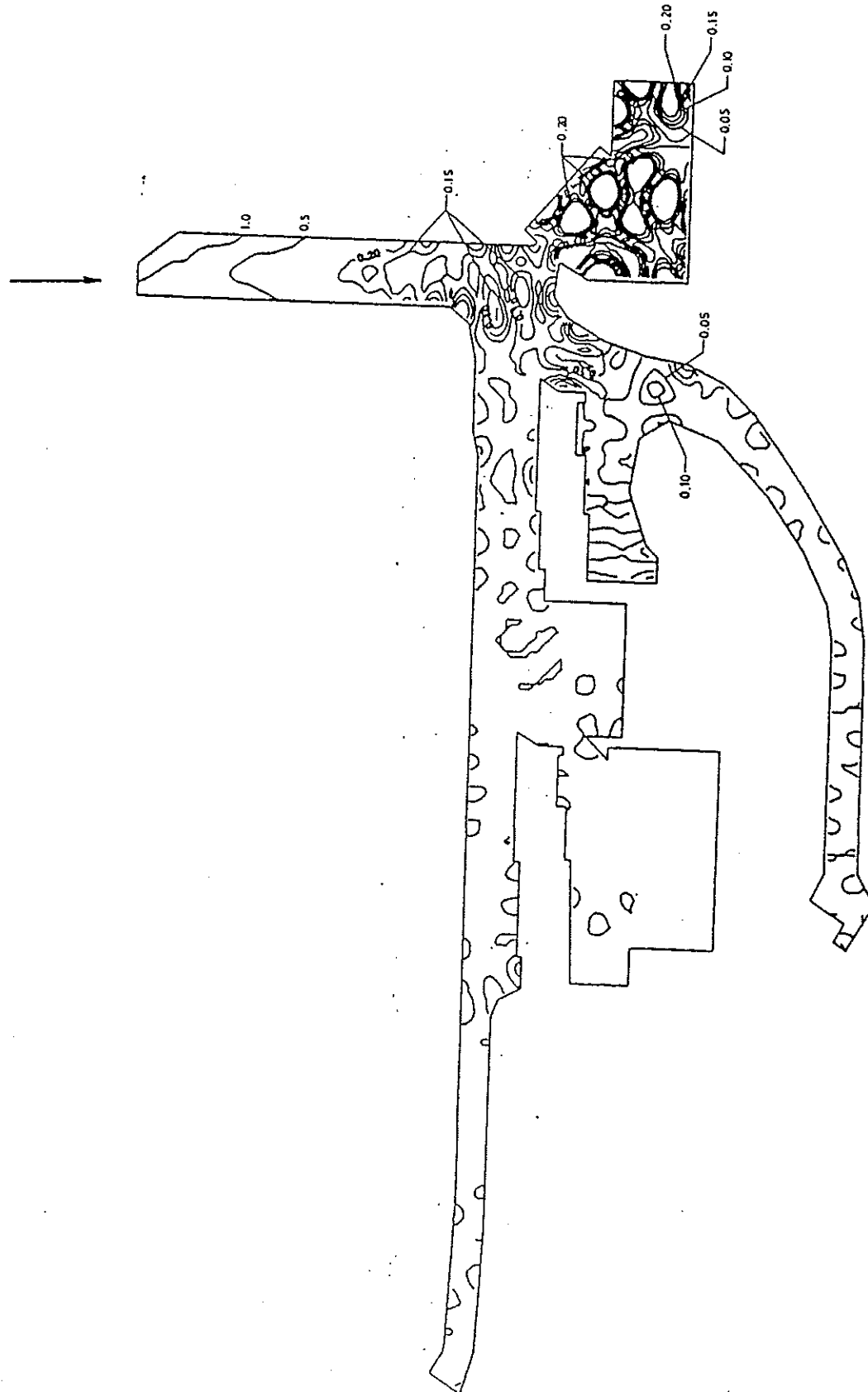


Figura 6. Líneas de isoamplitud.

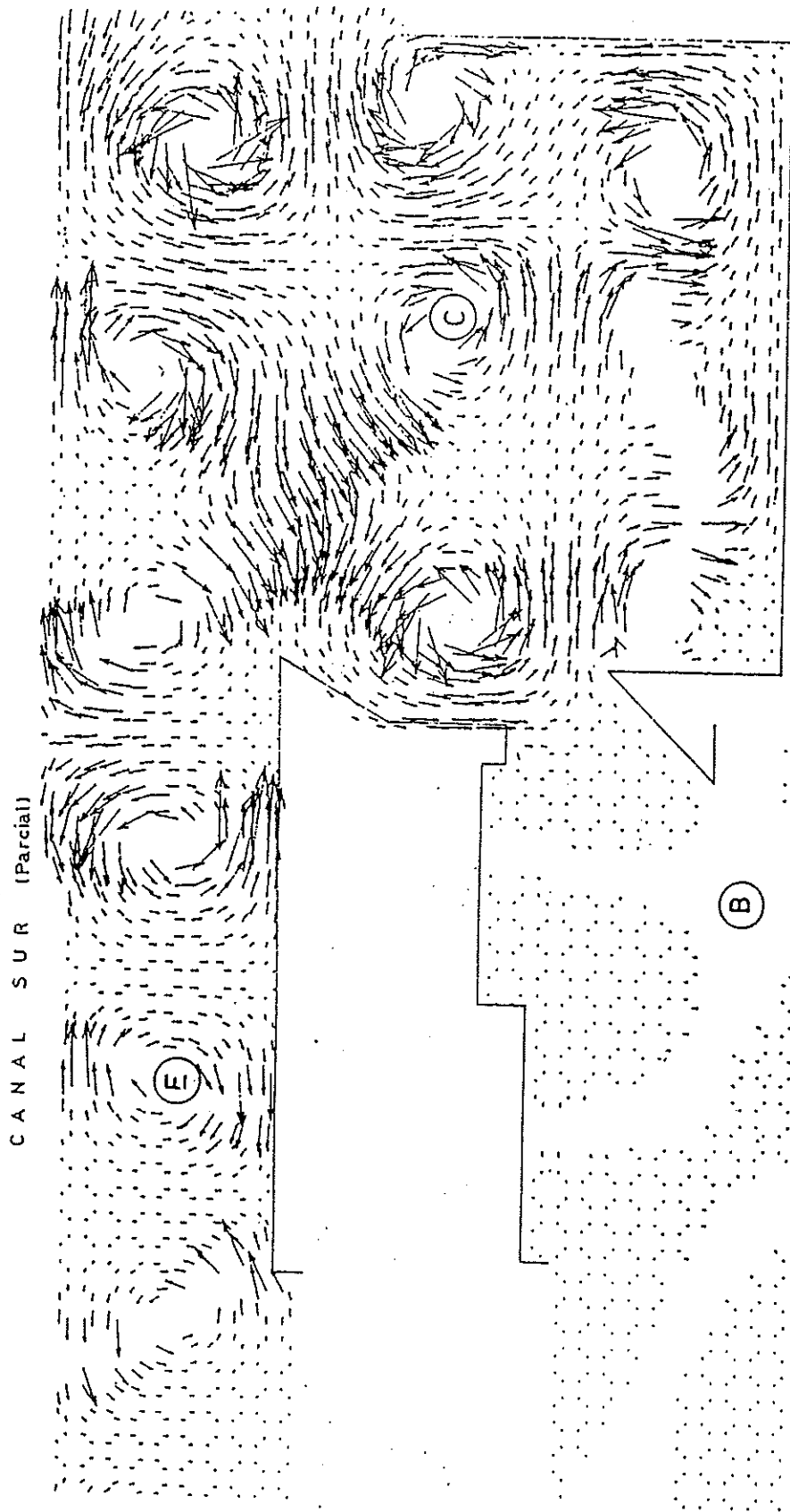


Figura 7. Campo de vectores número de onda.

La dirección de propagación del oleaje dentro de la marina es un parámetro importante de analizar desde el punto de vista práctico, ya que, según cómo estén orientadas las embarcaciones respecto de aquella, las alturas máximas de ola admisible son diferentes. En la Figura 7 la dirección de propagación del oleaje en un sector de la marina se representa mediante el campo de vectores número de onda.

Este fue graficado sólo donde la amplitud relativa supera el 5 %. El módulo de los vectores está escalado respecto del correspondiente a una onda progresiva del mismo período. En la zona B se observa que los vectores número de onda son muy pequeños, lo cual corresponde a un sistema de ondas estacionarias. En las zonas C y E se distingue la presencia de puntos anfidrómicos, alrededor de los cuales giran los frentes de onda (normales al vector número de onda local).

Como todo sistema físico sometido a oscilaciones forzadas, los puertos pueden estar sujetos a fenómenos de resonancia<sup>7</sup>. Por ello, es importante analizar la agitación para todo el rango de períodos de olas factibles de existir. Se efectuaron una larga serie de ensayos para períodos comprendidos entre 9 y 60 segundos, con incrementos de entre 1 y 2 segundos, determinándose, en cada ensayo, la máxima amplitud en cada zona del puerto. En la Figura 8 se muestra el comportamiento de las Dársenas A y D. Se observa que la dársena A presenta varios picos, dos de ellos de relativa importancia. En particular, se ve que para un período de 9 segundos hay un pico secundario que prácticamente duplica la amplitud respecto de otras dársenas. Esta es, precisamente, la condición que corresponde a la vista tridimensional presentada en la Figura 3.

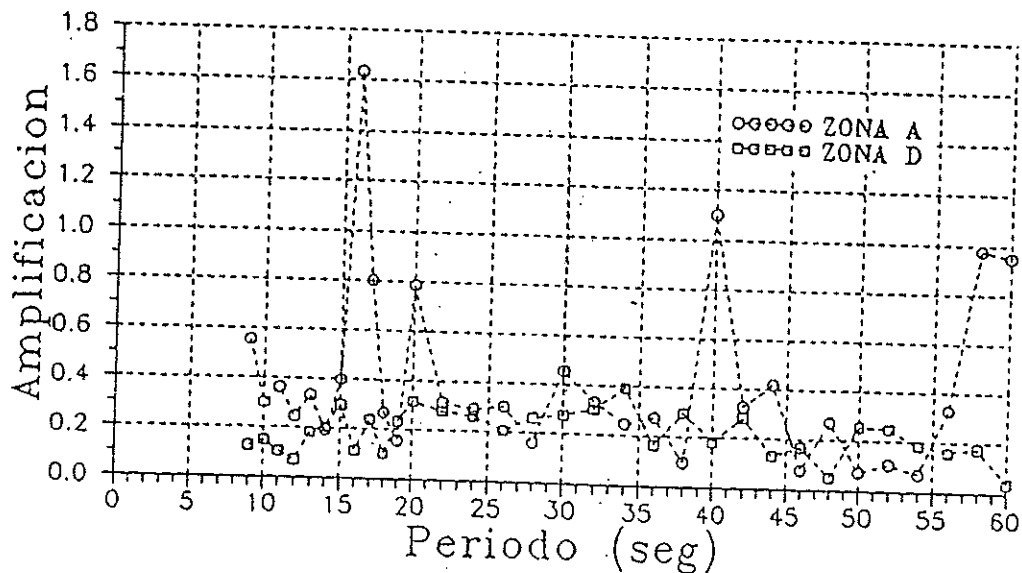


Figura 8. Curva de Resonancia.

## CONCLUSIONES

A través de la presentación de una aplicación, se ha ilustrado el alcance práctico de los resultados obtenidos con un modelo numérico de agitación por oleaje en el interior de un puerto desarrollado en el LHA. El estudio requirió de una estrecha colaboración entre los encargados del proyecto de la obra y los responsables del desarrollo y la operación del modelo, lo cual se tradujo en un pleno aprovechamiento de los resultados obtenidos.

## REFERENCIAS

1. C.A. Vionnet y A.N. Menéndez, "Difracción-Refracción combinadas de ondas de agua. Cálculo utilizando elementos finitos híbridos, incluyendo bordes absorbentes y disipación por fricción", *ENIEF'87*, San Carlos de Bariloche, (1987).
2. C.A. Vionnet, "Difracción-Refracción combinadas en ondas de agua", *Informe LHA-INCyTH 064-02-87*, (1987).
3. J.C.W. Berkhoff, "Computation of combined refraction-diffraction", *Proc. 19th. Conf. on Coastal Engineering*, Vancouver, (1972).
4. J.C.W. Berkhoff, N. Booij y A.C. Radder, "Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear waves", *Coastal Engineering 6*, Elsevier Publishers, pp. 255-279, Amsterdam, (1982).
5. N. Booij, "Gravity waves on water with non-uniform depth and current", *Report No. 81-1*, Delft University of Technology, (1982).
6. M.A. Cavaliere, R. Castellano y A.N. Menéndez, "Estudio de las condiciones de agitación en la marina de Punta del Este. Informe de avance No. 1", *Informe LHA-INCyTH 112-01-90*, (1990).
7. C.A. Vionnet, "Resonancia de puertos inducida por ondas gravitatorias", *Informe INCyTH 064-05-88*, (1988).