

## DISEÑO ÓPTIMO DE LAGUNAS DE ABSORCIÓN PARA CONTROLAR AMPLITUDES MAREALES Y NIVELES DE TURBIDEZ EN ESTUARIOS

### OPTIMAL DESIGN OF RETENTION BASINS FOR CONTROLLING TIDAL AMPLITUDES AND TURBIDITY LEVELS IN ESTUARIES

Cecilia I. Stoklas<sup>a</sup>, Víctor H. Cortínez<sup>a,b,c</sup> y Patricia N. Domínguez<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>*Centro de Investigación en Mecánica Teórica y Aplicada CIMTA, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca, 11 de abril 461, 8000 Bahía Blanca, Argentina, stoklas@frbb.utn.edu.ar*

<sup>b</sup>*Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253, 8000 Bahía Blanca, Argentina, pdoming@uns.edu.ar*

<sup>c</sup>*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnica, CONICET  
vcortine@frbb.utn.edu.ar*

**Palabras clave:** Modelo de transporte de sedimentos, lagunas de absorción, análisis modal, optimización.

**Resumen.** A los efectos de describir el comportamiento hidrodinámico de un sistema combinado de estuario-lagunas de absorción, se desarrolla una metodología basada en la aplicación del enfoque de Galerkin, haciendo uso de funciones modales (obtenidas mediante el Método de Elementos Finitos), que conduce a un modelo hidrodinámico de orden reducido. De esta forma se logra un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias que permiten establecer en forma expeditiva la amplitud de marea y los niveles de turbidez dentro de un estuario. Tal enfoque resulta de especial interés para el diseño óptimo de lagunas de retención.

**Keywords:** Sediment transport model, retention basins, modal analysis, optimization.

**Abstract.** In order to describe the hydrodynamic behavior of a combined system of estuary- retention basins, a methodology is developed based on the application of Galerkin's approach, making use of modal functions (obtained by the Finite Element Method), which leads to a hydrodynamic model of reduced order. In this way, a system of ordinary differential equations is achieved that allows the tidal range and turbidity levels to be established expeditiously within an estuary. Such an approach is of special interest for the optimal design of retention basins.

## 1 INTRODUCCIÓN

En las costas de los estuarios se hallan ubicados importantes emplazamientos urbanos alrededor del mundo. Para aprovechar de manera adecuada las potencialidades de estuarios se realizan importantes obras de ingeniería tales como emplazamiento de puertos, construcción de diques, tareas de dragado para mantenimiento de vías de navegación, etc. En varias ocasiones, tales acciones antrópicas traen aparejados importantes problemas ecológicos que deben ser subsanados. En particular, un problema de especial importancia es la amplificación de amplitudes mareales y generación de turbidez, debido a la existencia de condiciones hidrodinámicas resonantes. Estas últimas pueden darse naturalmente o debido a modificaciones antrópicas, como ha ocurrido en ciertos estuarios de Europa (Roos y Schuttelaars, 2015; Alvarez et al., 2001).

Un enfoque reciente de solución a esta problemática se basa en la construcción de lagunas de absorción conectadas al canal principal, cuya finalidad es la de atenuar la energía de las oscilaciones mareales, que ingresan en estuarios con condiciones cuasi resonantes, y de esta forma minimizar las amplitudes mareales y velocidades hidrodinámicas asociadas a la generación de turbidez. Tales lagunas actuarían como absorbedores dinámicos de oscilación hidrodinámica. Este tipo de soluciones ha sido estudiada para resolver tal problemática en el estuario de Ems, ubicado en la frontera entre Holanda y Alemania (Roos y Schuttelaars, 2015; Damveld, 2015).

Como aspectos fundamentales en el diseño de estos dispositivos pueden mencionarse las dimensiones geométricas de las lagunas así como su ubicación en el estuario, que afectan significativamente la dinámica mareal. En tal sentido, desde una perspectiva de diseño óptimo los autores (Domínguez et al., 2019) desarrollaron un modelo de simulación–optimización con el objeto de obtener un diseño de lagunas que minimicen los efectos producidos por resonancia mediante un enfoque linealizado unidimensional para la formulación de la dinámica mareal. En un trabajo posterior (Stoklas et al., 2019) se consideró además el control en los niveles de turbidez para un sistema forzado por una combinación de mareas del tipo M2M4. El procedimiento seguido en ambas publicaciones se basó en una solución mediante el Método de Elementos Finitos (MEF) del modelo hidrodinámico simplificado, en combinación con la técnica de Recocido Simulado, en inglés Simulated Annealing (SA).

Siguiendo con la misma línea de investigación, en este trabajo se presenta una nueva metodología de solución para describir la hidrodinámica del sistema estuario-lagunas. La misma corresponde al desarrollo de un modelo reducido bidimensional, mediante la expansión modal de la elevación de la superficie libre del estuario, que requiere de formas modales calculadas con el MEF. Luego, haciendo uso del enfoque de Galerkin se llega a un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, las cuales permiten determinar de forma expeditiva las amplitudes de la superficie libre del mar y de las velocidades hidrodinámicas, así como también los niveles de turbidez dentro del estuario. La velocidad de cálculo que permite el enfoque propuesto, lo hace especialmente atractivo para su utilización en el marco de un problema de optimización. En este trabajo se utiliza el modelo reducido, en combinación con el método de SA, para determinar de marea óptima las principales dimensión de las lagunas de absorción y sus ubicaciones dentro del estuario.

A los efectos de mostrar la eficiencia de este nuevo enfoque de solución, el mismo se lo compara con una solución del problema forzado transitorio obtenida mediante el MEF. Luego, se presentan ejemplos del diseño óptimo de lagunas de absorción a los efectos de ilustrar la presente metodología.

## 2 MODELO TEÓRICO DEL SISTEMA ESTUARIO-LAGUNAS DE ABSORCIÓN

### 2.1 Modelo hidrodinámico

El análisis hidrodinámico del sistema, como el que se muestra en el esquema idealizado de la [Figura 1](#), se formula a partir de las ecuaciones bidimensionales de aguas poco profundas. Tales ecuaciones pueden ser expresadas, en su versión linealizada, de la siguiente forma ([Cortínez, et al., 2014](#)):

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + f_0 \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( g H_0 \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( g H_0 \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) = \sum_{j=1}^{NL} -b_j h_j \frac{\partial v_j}{\partial t} \delta(x-x_j)(y-y_j), \\ \frac{\partial U}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - U f_0, \\ \frac{\partial V}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - V f_0, \end{cases} \quad (1)$$

siendo  $\eta$  la elevación en la superficie libre,  $t$  el tiempo,  $f_0$  la fricción de fondo linealizada de acuerdo a la aproximación de [Lorentz \(1922\)](#),  $g$  la aceleración de la gravedad,  $H_0(x,y)$  la profundidad y  $U$  y  $V$  las velocidades verticalmente promediadas en las direcciones de  $x$  e  $y$ , respectivamente. El segundo término de la primera ecuación corresponde al acoplamiento con las lagunas de absorción, donde  $v_j$  es la velocidad en el canal lateral (considerada positiva hacia la laguna),  $b_j$  el ancho,  $h_j$  la profundidad del canal de salida hacia la laguna,  $NL$  el número de lagunas y  $\delta$  corresponde a la función delta de Dirac en los puntos  $j$ -ésimos. El sistema (1) se completa con las siguientes condiciones de borde e iniciales:

$$\eta|_{BA} = \bar{\eta}_0(t) \quad , \quad -g \frac{\partial \eta}{\partial n} \Big|_{BI} = 0 \quad , \quad \eta|_{t=0} = \bar{\eta}(x,y) \quad , \quad (2)$$

donde la primera condición implica que se asume un valor conocido de la elevación mareal  $\bar{\eta}_0(t)$  en la boca del estuario (Borde Abierto, *BA*), la segunda condición de borde indica que la velocidad normal a la cosa es nula (Borde Impermeable, *BI*) y la tercera indica la condición inicial.

Por otra parte, la hidrodinámica correspondiente a cada laguna de absorción puede expresarse utilizando las ecuaciones de momentum y de continuidad simplificadas que se muestran a continuación:

$$\begin{cases} \frac{dv_j}{dt} + \frac{r_j}{h_j} v_j = -g \left( \frac{\xi_j - \eta_j}{l_j} \right), \\ A_j \frac{d\xi_j}{dt} = b_j h_j v_j \quad , \end{cases} \quad (3)$$

donde  $A_j$  es el área en planta de la laguna  $j$ -ésima,  $r_j$  es el coeficiente de fricción linealizado,  $l_j$  es la longitud del canal,  $\xi_j$  es la elevación de la superficie libre de la laguna y  $\eta_j = \eta(x_j, y_j, t)$ .

Finalmente, eliminando  $v_j$  de las ecuaciones (3), el sistema gobernante (1-3) puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + f_0 \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( gH_0 \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( gH_0 \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) = \sum_{j=1}^{NL} -A_j \frac{d^2 \xi_j}{dt^2} \delta(x-x_j)(y-y_j), \\ A_j \frac{d^2 \xi_j}{dt^2} + \frac{r_j}{h_j} A_j \frac{d\xi_j}{dt} + \frac{gb_j h_j}{l_j} \xi_j = \frac{gb_j h_j}{l_j} \eta_j, \\ \frac{\partial U}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - Uf_0, \\ \frac{\partial V}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - Vf_0. \end{array} \right. \quad (4)$$

## 2.2 Transporte de sedimentos

El movimiento del sedimento depende de la asimetría de las corrientes hidrodinámicas. En tal sentido si la condición de flujo es mayor que la de reflujo, el transporte de sedimento se da aguas adentro del estuario. Caso contrario, si las corrientes de reflujo tienen mayor magnitud que las de ingreso, el sedimento es exportado hacia afuera del estuario. Existen en la literatura diversas expresiones que representan esta relación (Soulsby, 1997). En este trabajo se emplea la siguiente fórmula propuesta por Engelund y Hansen (1972):

$$S = \frac{B_0 0.04 C_D^{3/2} U^5}{[g(\rho_r - 1)]^2 d_{50}}, \quad (5)$$

donde  $B_0$  es el ancho del estuario,  $C_D$  el coeficiente de arrastre,  $\rho_r$  la relación entre la densidad del sedimento y la del medio acuático, y  $d_{50}$  el tamaño del grano del sedimento. Luego, el promedio temporal del transporte de sedimentos durante un período se puede calcular de la siguiente forma:

$$TNS = \frac{\int_{t_0}^{t_0+Tp} S dt}{Tp}, \quad (6)$$

siendo  $t_0$  un tiempo cualquiera y  $Tp$  el período de la marea.

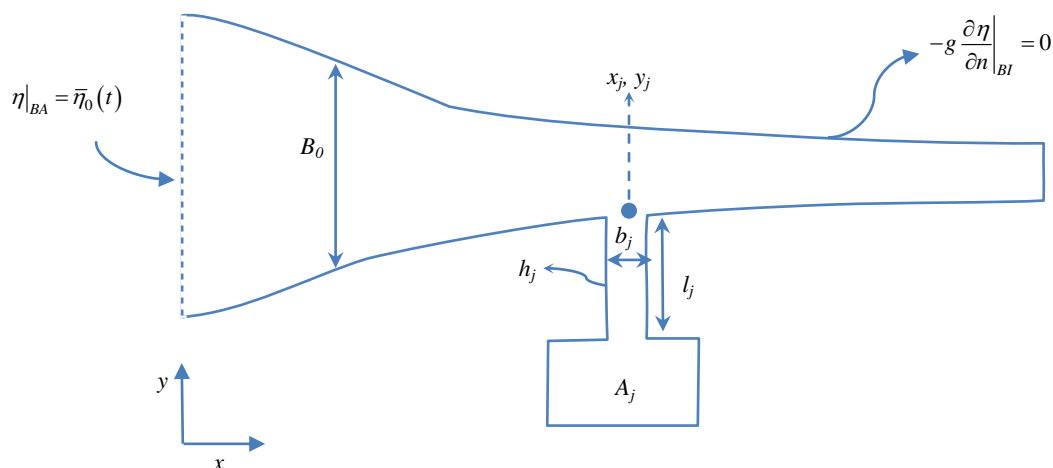


Figura 1: Esquema idealizado de estuario-lagunas de absorción.

### 3 MODELO HIDRODINÁMICO REDUCIDO

Es posible resolver el sistema (4) efectuando una expansión de la elevación  $\eta$  en términos de modos de oscilación del estuario de la siguiente manera:

$$\eta(x, y, t) = \bar{\eta}_0(t) + \sum_{n=1}^N \tau_n(t) \psi_n(x, y) \quad , \quad (7)$$

donde,  $\tau_n(t)$  son las incógnitas del modelo reducido mientras que  $\psi_n(x, y)$  son las formas de oscilación hidrodinámica libre del estuario, que satisfacen la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( gH_0 \frac{\partial \psi_n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( gH_0 \frac{\partial \psi_n}{\partial y} \right) + \psi_n \omega_n^2 = 0 \quad , \quad (8)$$

junto con las siguientes condiciones de borde homogéneas:

$$\psi_n|_{BA} = 0 \quad , \quad gH_0 \frac{\partial \psi_n}{\partial x} \Big|_{BI} = 0 \quad . \quad (9)$$

Para obtener las ecuaciones gobernantes en función de  $\tau_n(t)$ , se reemplaza (7) en el sistema (4), y teniendo en cuenta la expresión (8), se obtienen las siguientes expresiones:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \frac{d^2 \tau_i}{dt^2} \psi_i + f_0 \sum_{i=1}^N \frac{d \tau_i}{dt} \psi_i + \sum_{i=1}^N \tau_i \psi_i \omega_i^2 = \sum_{j=1}^{NL} -A_j \frac{d^2 \xi_j}{dt^2} \delta_j - \frac{\partial^2 \bar{\eta}_0}{\partial t^2} - f_0 \frac{\partial \bar{\eta}_0}{\partial t} \quad , \\ A_j \frac{d^2 \xi_j}{dt^2} + \frac{r_j}{h_j} A_j \frac{d \xi_j}{dt} + \frac{gb_j h_j}{l_j} \xi_j = \frac{gb_j h_j}{l_j} \left( \bar{\eta}_0(t) + \sum_{n=1}^N \tau_n(t) \psi_n(x, y) \right) \end{cases} \quad (10)$$

Luego, aplicando el método de Galerkin a la primera de las ecuaciones anteriores y considerando además las condiciones de ortogonalidad de las funciones  $\psi_n(x, y)$ , el sistema (10) se reduce a un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, que puede re expresarse como el siguiente sistema de primer orden:

$$\begin{cases} \frac{d \tau_n}{dt} = P_n, \\ \frac{d P_n}{dt} = -P_n f_0 - \tau_n \omega_n^2 - \sum_{j=1}^{NL} A_j \beta_j \frac{\psi_n(x_j, y_j)}{\int_{\Omega} \psi_n^2 d\Omega} - \frac{d^2 \bar{\eta}_0}{dt^2} \frac{\int_{\Omega} \psi_n d\Omega}{\int_{\Omega} \psi_n^2 d\Omega} - f_0 \frac{d \bar{\eta}_0}{dt} \frac{\int_{\Omega} \psi_n d\Omega}{\int_{\Omega} \psi_n^2 d\Omega}, \\ \frac{d \xi_j}{dt} = M_j, \\ \frac{d M_j}{dt} = \beta_j, \end{cases} \quad (11)$$

donde  $\beta_j = -\frac{r_j}{h_j} M_j - \frac{gb_j h_j}{A_j l_j} \xi_j + \frac{gb_j h_j}{A_j l_j} \bar{\eta}_0(t) + \frac{gb_j h_j}{A_j l_j} \sum_{i=1}^N \tau_i \psi_i(x_j, y_j)$ ,  $n=1, 2, \dots, N$  y  $j=1, 2, \dots, NL$ .

### 4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE DISEÑO ÓPTIMO

Se considera, un estuario como el mostrado en la Figura 1. Se pretende minimizar los valores de elevación mareal  $\eta$  manteniendo el transporte neto de sedimentación  $TNS$  en la

boca del estuario por debajo de cierto límite tolerable. Este último valor indica los sedimentos que ingresan al estuario y pueden potencialmente generar turbidez (Lugt, 2012). Para esto se prevé la construcción potencial de dos lagunas. En tal sentido, se buscará la mejor ubicación de éstas  $(x_j, y_j)$  sobre el margen de la costa, como así también la forma y tamaño de cada una. Tales dimensiones dependerán del área de las lagunas  $(A_j)$  y del largo  $(l_j)$ , ancho  $(b_j)$  y profundidad  $(h_j)$  de los canales laterales que las conectan con el estuario.

A los efectos de cumplir con el objetivo propuesto, es posible formular matemáticamente el problema de la siguiente manera:

$$\left( X_j^*, A_j^*, L_j^*, B_j^*, H_j^* \right) = \arg \min \eta_{m\acute{a}x} , \quad (12)$$

$$s.a. \begin{cases} X_{m\acute{i}n} \leq X_j \leq X_{m\acute{a}x}, \\ A_{m\acute{i}n} \leq A_j \leq A_{m\acute{a}x}, \\ L_{m\acute{i}n} \leq L_j \leq L_{m\acute{a}x}, \\ B_{m\acute{i}n} \leq B_j \leq B_{m\acute{a}x}, \\ H_{m\acute{i}n} \leq H_j \leq H_{m\acute{a}x}, \\ TNS_{boca} \leq TNS_{l\acute{i}mite}, \\ \eta_{m\acute{a}x} \leq \eta_{l\acute{i}mite}. \end{cases} \quad (13)$$

La última restricción de (13) debe ser verificada debido a que un incorrecto diseño de lagunas puede ocasionar un aumento de la amplitud de marea.

Para resolver el problema de diseño planteado es necesario determinar las amplitudes dentro del estuario. Para ello deben calcularse inicialmente las formas modales  $\psi_n$  asociadas a éste, resolviendo mediante el MEF la ecuación (8) (esto se realiza aquí con el programa computacional FlexPDE). Una vez calculadas tales formas por única vez, es posible determinar las amplitudes del estuario mediante la expresión (7), resolviendo para cada nueva configuración de variables de diseño, las funciones  $\tau_n$  del sistema (11).

El procedimiento de optimización se realiza mediante el método de SA, el cual es programado bajo ambiente Matlab. La metodología consiste en verificar el cumplimiento de las restricciones (13) y evaluar la función objetivo (12) para cada configuración nueva de variables de diseño. Luego, el algoritmo detiene la búsqueda cuando las soluciones factibles aceptadas no producen mejoras durante un determinado número de iteraciones.

## 5 RESULTADOS NUMÉRICOS

### 5.1 Ejemplo 1: Diseño de lagunas de absorción bajo condiciones mareales simétricas.

Se considera a manera de ejemplo un estuario en condiciones mareales cuasi resonantes. En este caso se asume que el forzante mareal corresponde a una marea semidiurna del tipo S2 (período de 12 horas).

El estuario presenta forma de embudo con un largo  $(L_0)$  de 150 km. En el límite con el mar abierto la amplitud  $(\eta_0)$  de marea S2 en la boca es de 2 m y el ancho es de 3 km, disminuyendo hacia el interior hasta alcanzar 1 km en la cabeza de éste. La profundidad  $(H_0)$  máxima en la boca es de 11 m, decreciendo suavemente hasta alcanzar los 9 m aguas arriba. El coeficiente de fricción de fondo del estuario  $(f_0)$  es de  $1.05 \times 10^{-4} s^{-1}$  y el de los canales laterales  $(r_j)$  de  $2.18 \times 10^{-3}$  m/s. Se asume para el cálculo del sedimento un tamaño de grano

$d_{50}=2 \times 10^{-4}$  m y un coeficiente de arrastre  $C_D=2.5 \times 10^{-3}$ .

El estado del estuario, previo a la construcción de las lagunas, presentan valores máximos de  $\eta = 3$  m (en el fondo del estuario),  $U = 2.1$  m/s y  $TNS=0.09$  m<sup>3</sup>/s (estos últimos en la boca). Tales valores se han determinado con el sistema (1), mediante una solución transitoria con el MEF, utilizando el programa computacional FlexPDE.

A efectos del diseño de las lagunas de retención, se han adoptado los siguientes parámetros de restricción:  $X_{\min}=10$  km,  $X_{\max}=140$  km,  $A_{\min}=5 \times 10^6$  m<sup>2</sup>,  $A_{\max}=3 \times 10^8$  m<sup>2</sup>,  $L_{\min}=100$  m,  $L_{\max}=6000$  m,  $B_{\min}=10$  m,  $B_{\max}=100$  m,  $H_{\min}=5$  m,  $H_{\max}=9$  m,  $\eta_{\limite}=2.6$  m y  $TNS_{\limite}=0.09$  m<sup>3</sup>/s.

Para este ejemplo, cinco modos resultaron ser los necesarios para obtener una adecuada precisión del modelo reducido. Esto se puede ver comparando la solución simplificada (4) con la solución numérica del problema forzado transitorio mediante el MEF. En la Figura 2 se muestra dicha comparación en una posición a  $\frac{3}{4}$  del estuario. En el resto del estuario la solución presenta la misma precisión.

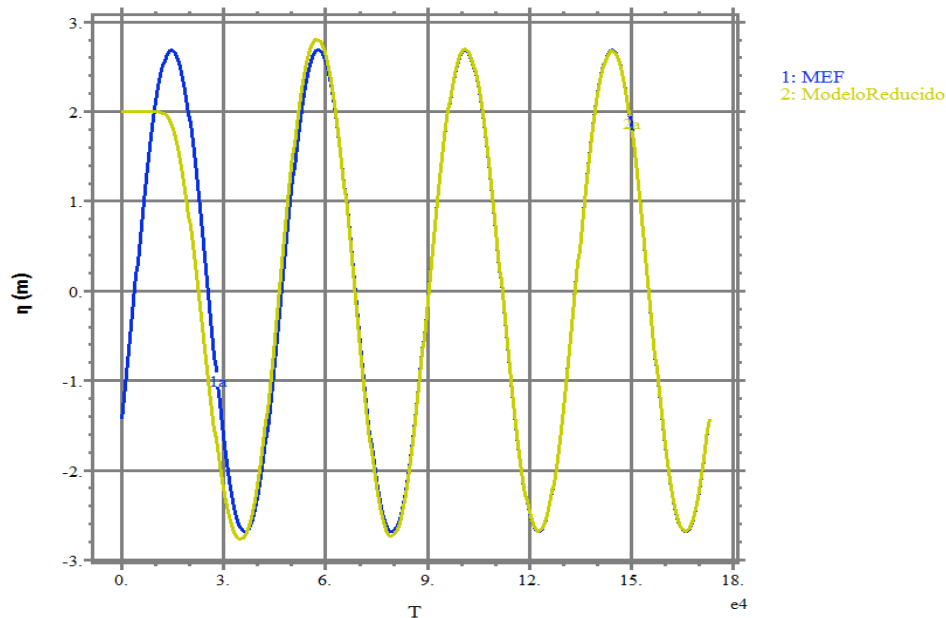


Figura 2: Comparación entre el modelo reducido y el MEF para el estado estacionario ( $x=110$  km).

Una vez realizado el procedimiento de optimización mediante la técnica de SA, las variables óptimas se obtienen luego de evaluar un poco más de 1000 escenarios factibles en un tiempo de cálculo computacional de aproximadamente 5 minutos. Es decir del orden de 1000 veces menor que lo que demanda la misma resolución con el problema transitorio.

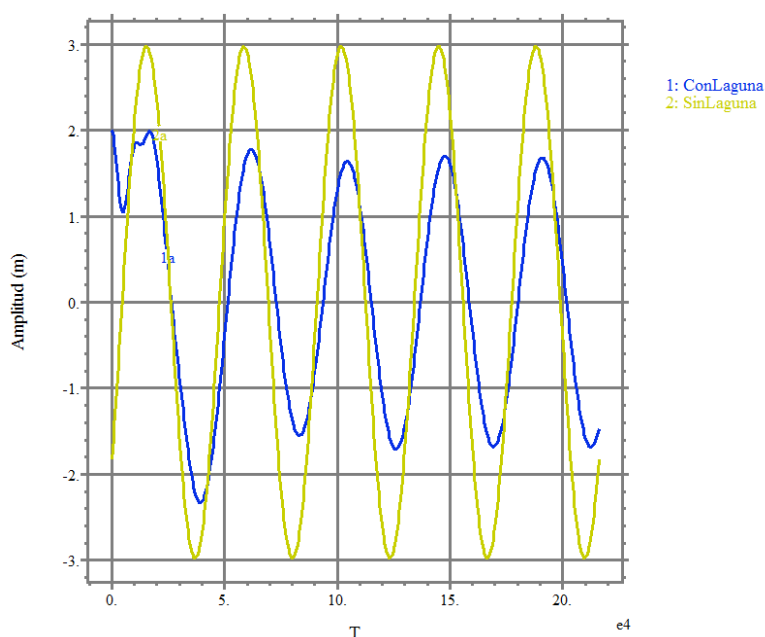
Los valores de las variables óptimas que minimizan las funciones objetivo (12) se indican en la Tabla 1. Las mismas son comparadas con una solución no factible de diseño, a los efectos de mostrar que una elección incorrecta de los valores en las variables de diseño puede llegar a empeorar la situación inicial, incrementando los valores de amplitud de marea y de transporte neto de sedimentación.

Debe observarse que en el ejemplo analizado la turbidez es despreciable debido a que las condiciones mareales, en este caso, resultan simétricas.

En la Figura 3 es posible observar que la amplitud del nivel del agua en cercanías de la cabeza del estuario disminuye en 1,30 m debido a la construcción de las lagunas con las dimensiones y en las coordenadas indicadas en la Tabla 1.

	Solución Óptima	Solución Factible	Solución No Factible
x1 (km)	130	140	20
y1 (km)	2067	2067	2867
x2 (km)	130	120	30
y2 (km)	933	800	200
A1 (m <sup>2</sup> )	$8,1 \times 10^7$	$2,18 \times 10^7$	$1 \times 10^7$
A2 (m <sup>2</sup> )	$4,63 \times 10^7$	$9,25 \times 10^6$	$9 \times 10^6$
L1 (m)	1300	1200	500
L2 (m)	4700	5800	500
B1 (m)	70	20	100
B2 (m)	90	60	100
H1 (m)	8,50	8	5
H2 (m)	8,50	9	5
$\eta_{max}$ (m)	1.7 (<2.6)	2.4	3.3
TNS (m)	0.027 (<0.089)	0.078	0.092

Tabla 1: Resultado del problema de diseño.

Figura 3: Comparación de  $\eta$  para las situaciones inicial (caso sin laguna) y óptima (con laguna) en  $x=140$  km.

## 5.2 Ejemplo 2: Diseño de lagunas de absorción bajo condiciones mareales asimétricas.

En este caso, se considera una situación donde el régimen hidrodinámico del estuario es gobernado por una marea semi-diurna M2 y una sobremarea M4, cuya frecuencia es exactamente el doble de la forzante principal. La combinación de ambas constituyentes mareales, que se originan en el mar abierto, produce asimetrías en las ondas de marea que se propagan hacia el interior del estuario. Esto genera que las corrientes de marea que ingresan (flujo) y egresan (reflujo) de forma periódica no sean de igual magnitud, alterando el transporte neto de sedimentación. Considerando las mismas dimensiones y parámetros utilizados en el ejemplo anterior, con una amplitud de marea M2 en la boca de 2 m y 0.5 m para la sobremarea M4, con una frecuencia principal  $\omega_2=2\pi/44712$  rad/s y fase relativa entre



ambas mareas  $\varphi=45^\circ$ , el estado del estuario previo a la construcción de las lagunas presenta un valor máximo en el fondo del estuario de  $\eta$  de 3.8 m, y en la boca las velocidades hidrodinámicas ( $U$ ) máximas de ingreso y egreso corresponden a 2.6 y -2.1 m/s respectivamente, lo que indica que las corrientes están dominadas por la condición de flujo (véase Figura 4), siendo el promedio temporal del transporte de sedimento ( $TNS$ ) durante un período de  $2.32 \text{ m}^3/\text{s}$ .

A efectos del diseño de las lagunas de retención, se han adoptado los mismos parámetros mínimos y máximos de diseño del ejemplo anterior a excepción de  $\eta_{\text{límite}}$  y de  $TNS_{\text{límite}}$ , que en este caso se fijó en 3 m y  $1.16 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente.

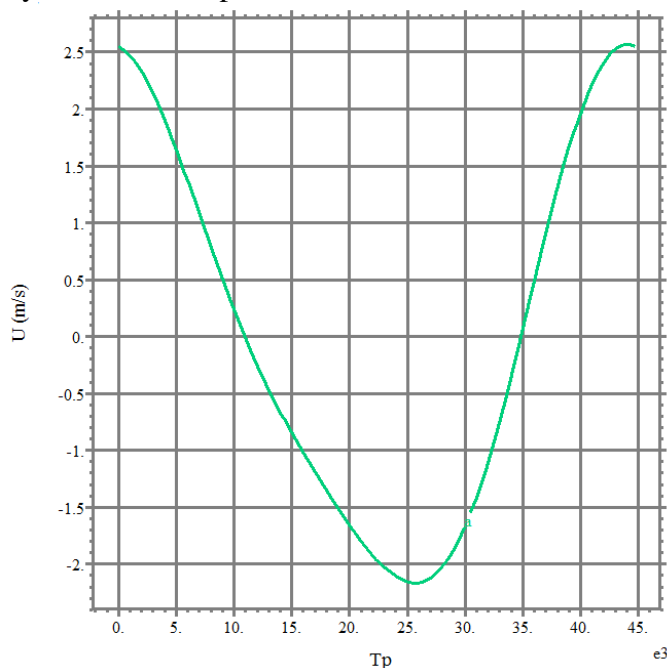


Figura 4: Comportamiento hidrodinámico para la situación inicial (caso sin laguna) en  $x=2.7$  km.

Una vez realizado el procedimiento de optimización, las variables óptimas se obtienen luego de evaluar no más de 2000 escenarios en un tiempo de cálculo de 13 minutos. Tales valores se indican en la Tabla 2.

En la Figura 5 se observa el comportamiento de la Función Objetivo ( $FO$  Óptima) durante el proceso de búsqueda de las variables óptimas, donde es posible notar que el valor mínimo obtenido en cada iteración se va almacenando.

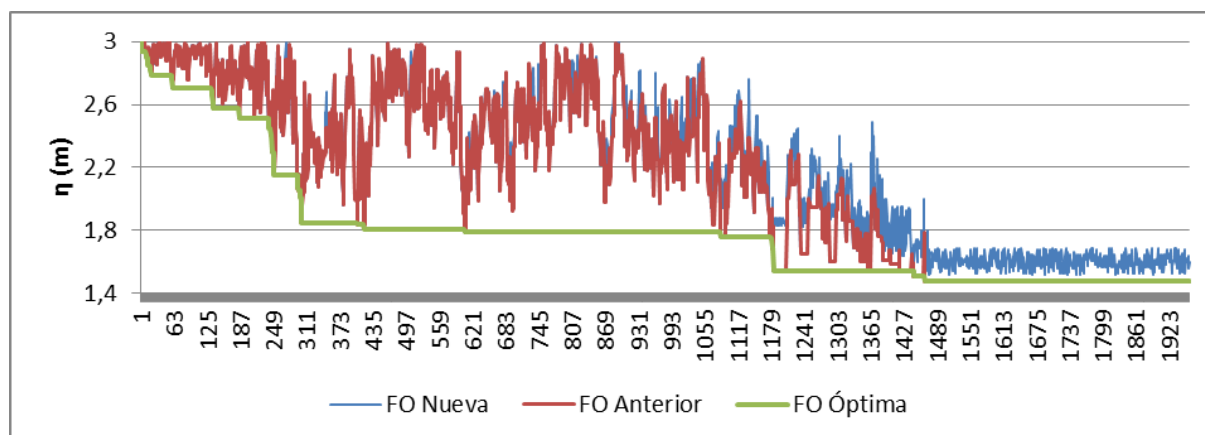


Figura 5: Evolución de la función objetivo en el proceso de optimización del problema de diseño.

Es oportuno mencionar que los valores mostrados en ambos ejemplos, coinciden numéricamente con los que se obtienen con un modelo detallado de elementos finitos.

x1 (km)	y1 (km)	x2 (km)	y2 (km)	A1 (m <sup>2</sup> )	A2 (m <sup>2</sup> )	L1 (m)	L2 (m)	B1 (m)	B2 (m)	H1 (m)	H2 (m)	$\eta_{max}$ (m)	TNS (m)
120	2200	140	933	6.6x10 <sup>7</sup>	9.13x10 <sup>7</sup>	4400	2800	80	100	8	9	1.5	0.7

Tabla 2: Resultados óptimos del segundo problema de diseño.

## 6 CONCLUSIONES

Se ha presentado un enfoque de optimización para el diseño de lagunas de absorción para minimizar las amplitudes mareales en estuarios. En este enfoque, la hidrodinámica del sistema acoplado estuario-lagunas de absorción se plantea mediante un modelo reducido bidimensional. Este último, es obtenido a partir de la expansión de la elevación hidrodinámica usando funciones de oscilación libre del estuario (determinadas mediante el MEF) y del método global de Galerkin, lo que conduce a un sistema reducido de ecuaciones diferenciales ordinarias.

Se ha puesto del manifiesto, mediante ejemplos numéricos, la eficiencia del modelo reducido a partir de una comparación con una solución detallada mediante el MEF de la hidrodinámica del sistema. En particular, se ha mostrado que es posible obtener una precisión comparable con la del modelo detallado, con un tiempo de cálculo sustancialmente menor.

Para la resolución de los problemas de diseño óptimo, la solución numérica del sistema reducido se combina con el método de Recocido Simulado. Los ejemplos numéricos presentados, han ilustrado la utilidad del uso de las lagunas de absorción para la minimización de la amplitud mareal en el estuario. Si bien los ejemplos mostrados son formulados con un modelo hidrodinámico lineal, la aplicación de la presente metodología al caso no lineal es directa.

## REFERENCIAS

- Alvarez O., Tejedor B. y Vidal J. La dinámica de marea en el estuario del Guadalquivir: un caso peculiar de resonancia antrópica. *Física de la Tierra*, ISSN: 0214-4557, 11–24, 2001.
- Cortínez, V. H., Stoklas C. I. y Domínguez, P. N. Diseño óptimo de estructuras portuarias para atenuar efectos resonantes por ondas largas. *Mec. Computacional*, 33:307–322, 2014.
- Damvel J. The Effects of Multiple Retention Basins on the Hydrodynamics in Convergent Tidal Channels. *Master thesis, Faculty of Engineering Technology, Holanda*, 2015.
- Domínguez, P.N., Stoklas C. I. y Cortínez, V. H. Atenuación de amplitudes mareales en estuarios mediante lagunas de absorción: Diseño Óptimo. *VII Congreso de Matemática Aplicada, Computacional e Industrial*. ISSN 2314-3282, 2019.
- Lugt D. The influence of retention basins on tidal dynamics in estuaries. *Master Tesis, Faculty of Engineering Technology, Holanda*, 2012.
- Lorentz, H.A. Het in rekening brengen van den weerstand bij schommelende vloeistofbewegingen. *De Ingenieur*, 37:695–696, 1922.
- Roos P. C. y Schuttelaars H. M. Resonance properties of tidal channels with multiple retention basins: role of adjacent sea. *Ocean Dynamics*, 65: 311–324, 2015.
- Soulsby R. Dynamics of marine sands. *Thomas Telford Publications*, London, 174–175, 1997.
- Stoklas C. I., Cortínez, V.H. y Dominguez, P.N. Control de turbidez en estuarios mediante lagunas de absorción dinámica. *V Congreso Bianual de Proyecto Integrador para la Determinación de la Calidad del Agua*, ISBN: 978-950-42-0163-2, 2019.