

## MODELO UNIDIMENSIONAL DE MAREA DE LA RÍA SAN JULIÁN, ARGENTINA

## ONE-DIMENSIONAL TIDAL MODEL OF THE RÍA SAN JULIÁN, ARGENTINA

Fernando J. Caviglia<sup>1</sup>

Walter C. Dragani<sup>2</sup>

Carlos A. Mazio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires  
Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP  
Casilla de correo 45 (1900)  
La Plata, Argentina

<sup>2</sup> Departamento de Oceanografía  
Servicio de Hidrografía Naval  
Av. Montes de Oca 2124  
(1271) Buenos Aires, Argentina

*Recibido en diciembre de 1993; aceptado en febrero de 1995*

### RESUMEN

Se implementó un modelo numérico unidimensional para sistemas de canales interconectados con el fin de simular la hidrodinámica de la marea de la ría San Julián, Argentina. En posiciones prefijadas dentro del sistema se pronosticaron la altura de la superficie libre y los caudales, utilizando un método implícito en diferencias finitas. Los resultados de la simulación numérica se compararon con mediciones de campo, y se obtuvo una correlación satisfactoria entre marea y corrientes predichas y observadas.

*Palabras clave:* modelo numérico, mediciones de marea y corrientes, análisis armónico, costa argentina.

### ABSTRACT

A one-dimensional numerical model for a system of interconnected channels was implemented to simulate the tidal hydraulics of the Ría San Julián, Argentina. Free surface displacement and discharge were computed from predetermined locations throughout the system using an implicit, finite-difference technique. The results of the numerical simulation were compared with field measurements, and a satisfactory correlation was obtained between observed and predicted tides and currents.

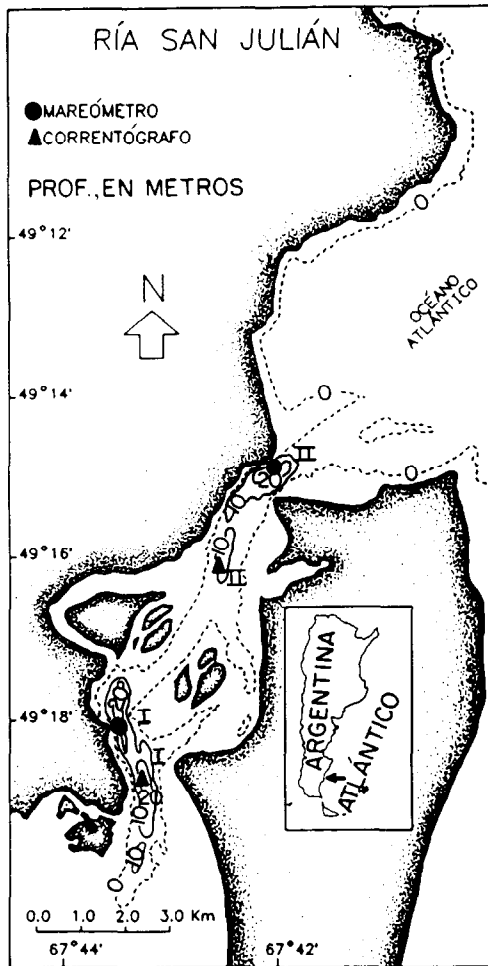
*Key words:* numerical model, tide and currents measurements, harmonic analysis, Argentina coast.

### INTRODUCCIÓN

La ría San Julián es una destacada penetración del mar ubicada en la costa patagónica argentina (fig. 1) y un típico canal de marea.

### INTRODUCTION

The Ría San Julián is a conspicuous inlet located on the Patagonian coast of Argentina and constitutes a typical tidal channel (fig. 1).



**Figura 1.** Área de estudio y ubicación de los correntógrafos y estaciones de marea.  
**Figure 1.** Study area and location of the tide stations and current-meters.

La posibilidad de desarrollar del cultivo de peces en el interior de la ría ha impulsado el estudio de la circulación de las aguas, para su manejo.

En esta investigación se implementó un modelo numérico para describir las características globales de la hidrodinámica de la marea en la ría San Julián.

#### ÁREA DE ESTUDIO

El interior de la ría San Julián es un puerto natural que permite un calado máximo de 9 m.

The possible development of fish farming in the inner region of the Ría San Julián has impelled the study of water circulation for management purposes.

In this study, a numerical model was applied to describe the global characteristics of the tidal hydrodynamics of the Ría San Julián.

#### STUDY AREA

The inner region of the Ría San Julián is a natural harbor which allows a maximum

No obstante, su acceso es peligroso debido a bancos y fuertes corrientes de marea. Sobre la margen izquierda se encuentra ubicada la ciudad de San Julián, con 5,000 habitantes, cuyas actividades principales se relacionan con la pesca comercial y la producción del caolín, arcilla blanca y fina utilizada en alfarería.

El área estudiada abarca cerca de 16 km<sup>2</sup> y se caracteriza por presentar dos canales interconectados (fig. 1). Uno corresponde al canal principal de navegación, cuya mayor profundidad es 34 m (Servicio de Hidrografía Naval [SHN], 1991). Gran parte del área de la ría San Julián está sujeta a inundaciones cuando las alturas superan el nivel medio de las bajamares (NMB). Cuando la altura de la marea se aproxima al NMB, en algunos lugares el flujo suele confinarse a los canales que se identifican claramente; en cambio, cuando la altura se aproxima al nivel medio de las pleamares (NMP) se inundan grandes áreas y el flujo se hace menos encauzado. La zona de bajo fondo, alrededor de las islas centrales, queda prácticamente inundada cuando la marea se acerca al NMP.

## MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático se basa en las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento para flujos no estacionarios, unidimensionales, en canales de sección transversal variable. La ecuación de continuidad para canales sin aportes laterales de caudal puede escribirse:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

donde  $A$  es el área de la sección transversal;  $Q$ , el caudal;  $x$ , distancia a lo largo de la vaguada; y  $t$ , tiempo.

La ecuación de movimiento para flujos unidimensionales en canales abiertos puede expresarse como

draught of 9 m. However, its access is dangerous due to shoals and strong tidal currents. The city of San Julián is located on the left margin with a population of 5,000 inhabitants, whose main activities are related to fishery business and the production of kaolin, a fine white clay used in pottery making.

The study area covers approximately 16 km<sup>2</sup> and is characterized by the presence of two interconnected channels (fig. 1). One of them is the main navigation channel with a maximum depth of 34 m (*Servicio de Hidrografía Naval* [SHN], 1991). A considerable area inshore of the Ría San Julián is subjected to flooding above mean low water (MLW). When tides are near MLW, flow in some locations is generally confined to the identified channels; whereas when tides are near mean high water (MHW), large areas are flooded and flow is not as well defined. The shoal zone around the central islands is almost completely flooded when tides are near MHW.

## MATHEMATICAL MODEL

The mathematical model is based on the continuity and momentum equations for one-dimensional, unsteady flow in channels of varying cross section. The equation of continuity for a channel with no lateral inflow can be written as

in which  $A$  is the cross-sectional area,  $Q$  the channel discharge,  $x$  the distance along the channel thalweg and  $t$  the time.

The equation of motion for one-dimensional, open-channel flow can be expressed as

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2\alpha \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} - \alpha \left( \frac{Q}{A} \right)^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{g n^2 |Q| Q}{AR^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad;  $\eta$ , desplazamiento vertical de la superficie del agua;  $n$ , coeficiente de rugosidad de Manning; y  $R$ , radio hidráulico. Las ecs. 1 y 2 se conocen como ecuaciones de Saint Venant y han sido utilizadas por muchos autores (Harleman y Lee, 1969; Fread y Smith, 1978; Schaffranek y Baltzer, 1980; Botev, 1991; Meselhe y Holly Jr., 1993). Una derivación detallada de dichas ecuaciones se encuentra en los trabajos de Henderson (1966) y Pujol y Menéndez (1987).

El coeficiente de momento o de Boussinesq,  $\alpha$ , expresa las irregularidades de la distribución de la velocidad sobre la sección transversal del canal. En el caso de canales con secciones transversales irregulares, compuestas por zonas profundas y amplias áreas someras, este coeficiente puede tomar valores de hasta 1.4 (Henderson, 1966). Sin embargo, en este trabajo se utilizó  $\alpha = 1$ .

Considerando que el área  $A$  es una función conocida de la profundidad total,  $d = h + \eta$ , donde  $h$  es la profundidad correspondiente al nivel medio medida desde la vaguada del canal (fig. 2), las derivadas de  $A$  se expresan en términos de la profundidad total:

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{\partial A}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial x} \quad (3)$$

and

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial A}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{\partial A}{\partial d} \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (4)$$

donde se supone que  $h$  es sólo una función de  $x$ .

Debe notarse que  $\partial A/\partial d$  es el ancho del canal  $B(d)$ . Amein y Fang (1970) establecieron que  $A(d)$  y  $B(d)$  deben estar vinculados para mantener la estabilidad numérica del modelo. Por tanto, si uno de ellos se obtiene mediante mediciones, el otro debe calcularse a partir del primero.

Sustituyendo la ec. 4 en la ec. 1, con  $B = \partial A/\partial d$ , se obtiene

$$B \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

Las ecs. 2 y 5 forman el sistema de ecuaciones por resolver. Con objeto de obtener una solución aproximada de la hidrodinámica de la

where  $g$  is the acceleration due to gravity,  $\eta$  the vertical water surface displacement,  $n$  the Manning roughness coefficient and  $R$  the hydraulic radius. Equations 1 and 2 are called the Saint Venant equations and have been used by many authors (Harleman and Lee, 1969; Fread and Smith, 1978; Schaffranek and Baltzer, 1980; Botev, 1991; Meselhe and Holly Jr., 1993). A detailed derivation of these equations can be found in the works of Henderson (1966) and Pujol and Menéndez (1987).

The coefficient  $\alpha$ , known as the momentum or Boussinesq coefficient, expresses any non-uniformity in the velocity distribution over the channel cross section. This coefficient may be as high as 1.4 when the cross section of the channel is irregular and consists of deep channels and extensive shallow areas (Henderson, 1966). However, in this study the value  $\alpha = 1$  was used.

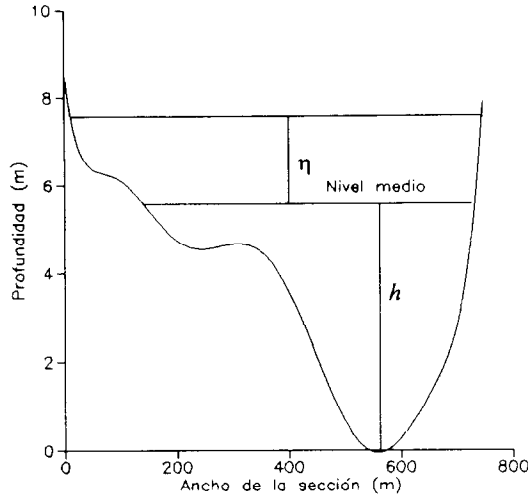
Since the flow area  $A$  is a known function of the total depth,  $d = h + \eta$ , where  $h$  is the depth of the mean water level measured from the channel thalweg (fig. 2), the derivatives of  $A$  are expressed in terms of the total depth,

in which  $h$  is assumed to be a function of  $x$  only.

It should be noted that  $\partial A/\partial d$  is the channel width  $B(d)$ . Amein and Fang (1970) stated that  $A(d)$  and  $B(d)$  should be compatible to ensure numerical stability. Therefore, if either  $A(d)$  or  $B(d)$  is obtained from measurements, the other should be determined from the first.

The substitution of eq. 4 into 1, with  $B = \partial A/\partial d$ , gives

The system to be solved is formed by eqs. 2 and 5. In order to obtain an approximate solution of the tidal hydraulics within the Ría San



**Figura 2.** Sección transversal típica en la ría San Julián, definición del esquema:  $h$  = profundidad correspondiente al nivel medio y  $\eta$  = desplazamiento vertical de la superficie del agua.

**Figure 2.** Typical cross section in Ría San Julian, definition of the sketch:  $h$  = depth of the mean water level and  $\eta$  = vertical water surface displacement.

marea en la ría San Julián, las derivadas parciales se reemplazaron por las siguientes expresiones en diferencias finitas:

Julián, the partial derivatives were replaced by the following finite-difference expressions:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f_i^{k+1} - f_i^k}{\Delta t} \quad (6)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \beta \left( \frac{f_{i+1}^{k+1} - f_{i-1}^{k+1}}{2\Delta x} \right) + (1 - \beta) \left( \frac{f_{i+1}^k - f_{i-1}^k}{2\Delta x} \right) \quad (7)$$

donde  $\Delta t$  es el paso en el tiempo;  $\Delta x$ , intervalo espacial de malla; y  $\beta$ , factor de peso que se utiliza para determinar el tiempo, entre los niveles de tiempo  $t^k$  y  $t^{k+1}$ , en el cual se evalúan las derivadas espaciales. Este factor es una constante real, que en el caso de los modelos implícitos generalmente permanece en el rango  $0.5 \leq \beta \leq 1$ . El valor utilizado en este trabajo fue  $\beta = 2/3$ .

El modelo empleado en este estudio utiliza un esquema de resolución implícito, y es con-

where  $\Delta t$  is the time step,  $\Delta x$  the horizontal grid spacing and  $\beta$  a weighting factor used to determine the time between the  $t^k$  and  $t^{k+1}$  time levels at which the spatial derivatives are evaluated. This factor is a real constant which generally lies in the range  $0.5 \leq \beta \leq 1$  for the implicit models. A value of  $\beta = 2/3$  was used in this study.

The model used in this study is an implicit resolution scheme, and is conceptually similar

ceptualmente similar al modelo numérico unidimensional para canales interconectados descrito por Schaffranek y Baltzer (1980). La aplicación de las expresiones 6 y 7 a las ecs. 2 y 5 da como resultado un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales, el cual se resolvió por eliminación Gaussiana. Debido a la no linealidad de dichas ecuaciones se tuvo que implementar un esquema iterativo en cada paso de tiempo.

En los puntos interiores de confluencia, los canales se vincularon entre sí como sigue:

$$\sum_{i=1}^m Q_i = 0 \quad (8)$$

$$\eta_i = \eta_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, m-1 \quad (9)$$

donde  $m$  es la cantidad de canales.

Las ecs. 8 y 9 surgen de considerar conservación de la energía y despreciar las diferencias en las velocidades (Dronkers, 1975; Schaffranek y Baltzer, 1980).

Las condiciones de contorno necesarias para resolver el modelo están dadas por mediciones de corrientes y marea. Las condiciones iniciales se tomaron suponiendo aguas quietas, es decir, inicialmente  $Q$  y  $\eta$  son cero en todo el recinto. Los resultados del modelo se hacen independientes de las condiciones iniciales en un tiempo de integración inferior a un ciclo de marea.

## MEDICIONES DE CAMPO

Las mediciones de marea y corrientes en la ría San Julián se realizaron entre el 19 de junio y el 3 de agosto de 1988. Los datos de marea se obtuvieron en forma horaria utilizando mareómetros ubicados en las estaciones de marea I y II (fig. 1). Cada uno de los mareómetros consistió en un arreglo de reglas de marea que fueron vinculadas a puntos fijos en tierra mediante nivelaciones geométricas. Simultáneamente al registro de la marea, se midieron corrientes a

to the one-dimensional numerical model for a system of interconnected channels described by Schaffranek and Baltzer (1980). Applying expressions 6 and 7 to eqs. 2 and 5, results in a system of nonlinear algebraic equations which was solved by Gaussian elimination. Due to the nonlinearity of the equations, an iterative scheme had to be implemented at each time step.

At the internal junctions, the channels are related as follows:

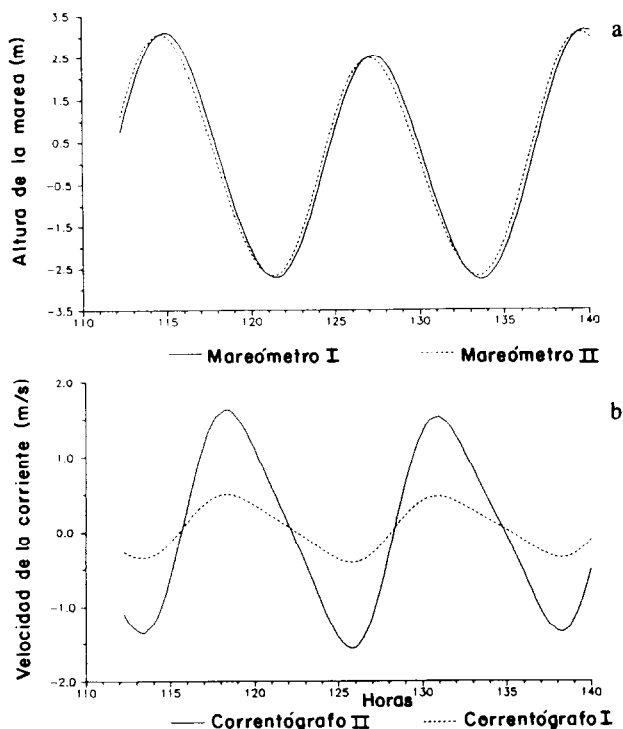
where  $m$  is the total number of channels.

Equations 8 and 9 can be obtained from considering the conservation of the energy and neglecting velocity differences (Dronkers, 1975; Schaffranek and Baltzer, 1980).

The boundary conditions needed for solving the model are given by tidal and current measurements. The initial conditions were taken as still-water values, *i.e.*,  $Q$  and  $\eta$  are zero everywhere. It takes less than one tidal cycle to obtain flow conditions independent of the initial values.

## FIELD MEASUREMENTS

Between 19 June and 3 August 1988, tidal-level observations and current measurements were made at the Ría San Julián. Tidal-level data were obtained hourly using tide staffs at tide stations I and II (fig. 1). Each tide staff referred to fixed points on land by means of geometric leveling. At the same time, tidal currents were measured in the middle of the water column at 15 min intervals at two positions within the Ría San Julián (fig. 1).



**Figura 3.** Registros de la marea en las estaciones I y II (a), y de la corriente de marea medida en las estaciones de corriente I y II (b).

**Figure 3.** Portions of tidal-level records observed at tide stations I and II (a) and portions of tidal current records measured at current stations I and II (b).

media agua, a intervalos de muestreo de 15 min, en dos sitios dentro de la ría San Julián (fig. 1).

Para analizar la contribución de cada componente de la marea, Mazio y D'Onofrio (1989) realizaron el análisis armónico de los datos con el método de mínimos cuadrados (Godin, 1972); de esta manera, se estudió la amortiguación o amplificación de cada componente a medida que la onda de marea se propaga por la ría. El análisis se realizó sobre 1,080 observaciones horarias, durante 45 días. El mismo método fue aplicado a los datos de corriente. Los resultados del análisis armónico se utilizaron para cotejar los valores de la marea y las corrientes predichas por el modelo numérico.

La fig. 3 muestra una fracción de los resultados del análisis armónico para la marea y la corriente. La onda de marea dentro de la ría se

In order to analyze the contribution from each tidal constituent, Mazio and D'Onofrio (1989) performed harmonic analyses of the data using a least squares method (Godin, 1972) to examine the damping or growth of each constituent as tide propagates through the Ría San Julián. The analyses were carried out using 1,080 hourly observations covering 45 days. The same method was also applied to the current data. The results of the harmonic analyses were used in this study for comparing the tides and currents predicted by the numerical model.

A portion of the results from the tide and current harmonic analyses are shown in fig. 3. The tide is amplified within the system and shows a phase lag with respect to that at the en-

amplifica y presenta un desfase con respecto a la marea en la boca. El retardo de la marea entre las estaciones II y I es de 22 min para las pleamares y 17 min para las bajamares. La amplitud de la marea astronómica en la estación I es ligeramente mayor que en la estación II. Las diferencias observadas entre ambas son de 20 cm en sicigias equinocciales de perigeo, 14 cm en sicigias medias, 6 cm en cuadraturas equinocciales de perigeo y 12 cm en cuadraturas medias (Mazio y D'Onofrio, 1989). A medida que la onda de marea se propaga dentro de la ría, los componentes más importantes, por ejemplo el  $M_2$ ,  $S_2$  y  $N_2$ , se amplifican, mientras que los componentes de aguas poco profundas se amortiguan. Conforme a esto, el cociente  $M_4/M_2$  decrece de 0.048 en la estación de marea II a 0.036 en la estación I.

Debido a que el registro de la corriente tuvo menor duración, se obtuvieron para ésta menos componentes armónicos que para la marea. Se encontró que el componente  $M_4$  tiene un efecto relativo más importante en la corriente que en la marea.

Las velocidades de las corrientes medidas en la estación de corriente II son mayores que las medidas en la estación de corriente I. Sin embargo, la dirección de las corrientes en ambos sitios es aproximadamente paralela a la línea de vaguada del canal, tanto para condiciones de flujo como de reflujó.

## ESQUEMATIZACIÓN DEL SISTEMA

La zona de la ría San Julián modelada se extiende desde la estación de marea II hasta la estación de corriente I, y se esquematizó como una red de dos canales unidimensionales interconectados.

Los datos batimétricos utilizados para describir la geometría de los canales del sistema se obtuvieron mediante un levantamiento hidrográfico realizado por el SHN (1992). La discretización del canal se realizó utilizando 35 secciones transversales separadas 360 m una de otra. Veinticuatro de ellas se usaron para describir la geometría del canal principal entre la estación de marea II y la estación de corriente I. Las once secciones restantes se emplearon para

trance of the Ría San Julián. The tidal difference between tide stations II and I is 22 min for high waters and 17 min for low waters. The range of the astronomical tide is slightly higher at tide station I than at tide station II. The differences are 20 cm for spring equinoctial perigean tides, 14 cm for mean spring tides, 6 cm for neap equinoctial perigean tides and 12 cm for mean neap tides (Mazio and D'Onofrio, 1989). As the tide propagates within the Ría San Julián, the major tidal constituents such as  $M_2$ ,  $S_2$  and  $N_2$  are amplified, whereas the shallow water components are damped. Accordingly, the ratio  $M_4/M_2$  decreases from 0.048 at tide station II to 0.036 at tide station I.

Since the current records were shorter than those of the tide, it was not possible to obtain as many constituents from the current records as were obtained from the tide records. The analyses showed that the  $M_4$  constituent has a greater relative effect on current data than on tide data.

The current velocities measured at current station II are greater than those measured at current station I. However, the current direction at both current stations is approximately parallel to the channel thalweg for flood and ebb conditions.

## SCHEMATIZATION OF THE SYSTEM

The modeled portion of the Ría San Julián extends from tide station II to current station I, and was schematized as a network of two interconnected, one-dimensional channels.

Bathymetric data depicting the bottom channel geometry of the system were obtained from hydrographic surveys carried out by the SHN (1992). A total of 35 cross-sectional profiles at equal intervals of 360 m were used to describe the system. Twenty-four of these cross sections were used to sketch the geometry of the main channel between tide station II and the current station I. The remaining eleven cross



describir el otro canal. Debido a que los canales son altamente irregulares, en cada sección el área en función de la profundidad total fue aproximada con un polinomio de cuarto orden, obtenido mediante la técnica de mínimos cuadrados. La expresión general para las áreas de cada una de las 35 secciones transversales es

$$A(d, I) = a_{0, I} + a_{1, I}d + a_{2, I}d^2 + a_{3, I}d^3 + a_{4, I}d^4 \quad (10)$$

donde el subíndice  $I$  denota la posición de cada sección en el canal.

Más de 500 sondeos distribuidos irregularmente se utilizaron para realizar una interpolación, aplicando el algoritmo de interpolación espacial de Kriging (Davis, 1986), lo cual permitió obtener una malla rectangular con una resolución de 50 m. Obtenidas las áreas, el ancho de cada sección transversal se calculó con la expresión  $B = \partial A / \partial d$  (Amein y Fang, 1970).

## RESULTADOS DEL MODELO

El modelo se forzó con la marea y las corrientes utilizando las componentes  $K_1$ ,  $M_2$  y  $M_4$ . El paso temporal adoptado fue de 900 s y el coeficiente de Manning fue fijado en 0.01. En la fig. 4 se presentan comparativamente la marea y las corrientes predichas y observadas. La amplitud de la marea predicha en la posición correspondiente a la estación I representa alrededor del 97% de la amplitud observada. Los valores predichos y observados de la marea tienen un desfase inferior a 20 min. Las corrientes observadas y predichas siguen un patrón similar. Los valores máximos de las corrientes de reflujo (positiva) observadas y predichas son similares y muestran un desfase de aproximadamente 45 min mientras que los valores máximos de las corrientes de flujo (negativa) observadas y predichas son algo diferentes pero están aproximadamente en fase. La máxima corriente de reflujo predicha por el modelo excede el valor máximo correspondiente a la corriente de flujo en aproximadamente un 20%. En la fig. 5 se presentan los diagramas de circulación obtenidos para las situaciones de flujo y reflujo de

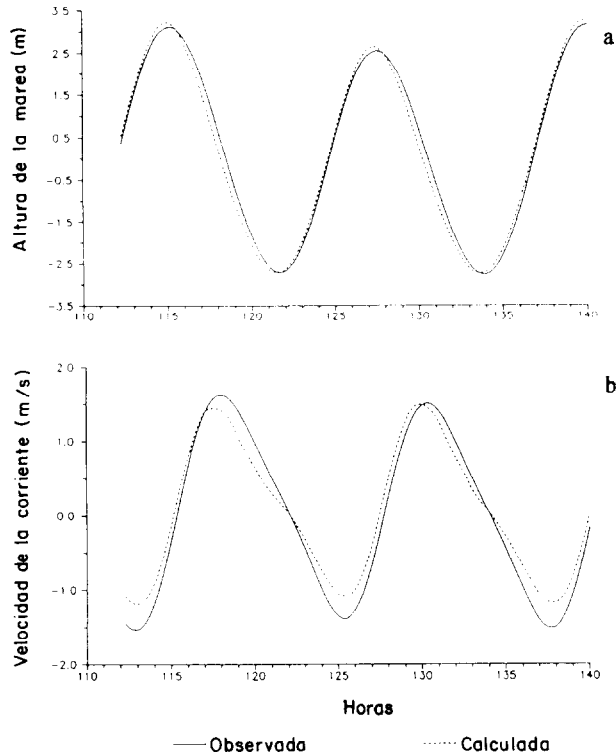
sections were used to depict the other channel. Since the channels are highly irregular, a least squares method was used to fit each individual area to a fourth-order polynomial expression to relate the cross-sectional area with the total depth. The general expression for all of the 35 cross-sectional areas is

where the subscript  $I$  refers to the location of any cross section within the channel.

More than 500 irregularly distributed soundings were used to make an interpolation by applying the Kriging spatial interpolation algorithm (Davis, 1986), which resulted in a rectangular grid with a 50 m resolution. Once the cross-sectional areas had been obtained, the channel widths were calculated from  $B = \partial A / \partial d$  (Amein and Fang, 1970).

## MODEL RESULTS

The model was forced with observed currents and tide using the tidal constituents  $K_1$ ,  $M_2$  and  $M_4$ . The predictions were made using a time step of 900 s and the Manning coefficient was set equal to 0.01. Examples of predicted *versus* observed tide and currents are shown in fig. 4. The predicted tidal range at tide station I is about 97% of the observed range. The time difference between equal values of observed and predicted sea level is less than 20 min. The phasing of predicted currents with respect to those observed follows a similar pattern. Peak values of both observed and predicted ebb currents (positive) are nearly equal and are within 45 min of each other, whereas peak values of both observed and predicted flood currents (negative) are somewhat different, but they do show an almost equal phase. The predicted maximum ebb currents exceed maximum flood currents by approximately 20%. Calculated flow patterns for flood and ebb conditions within the Ría San Julián are shown in fig. 5. The maximum current velocity occurs near tide station II with values of about 2 m/s. The current



**Figura 4.** Comparaciones entre las mareas predicha y observada en la estación I (a), y entre las velocidades de la corriente predichas y observadas en la estación de corriente II (b).

**Figure 4.** Comparison between observed and predicted tides at tide station I (a) and comparison between observed and predicted current velocities at current station II (b).

la ría San Julián. La máxima velocidad de la corriente ocurre en las proximidades de la estación de marea II con valores que alcanzan los 2 m/s. La intensidad de la corriente se atenúa gradualmente y alcanza valores de 0.5 m/s en la estación de corriente I.

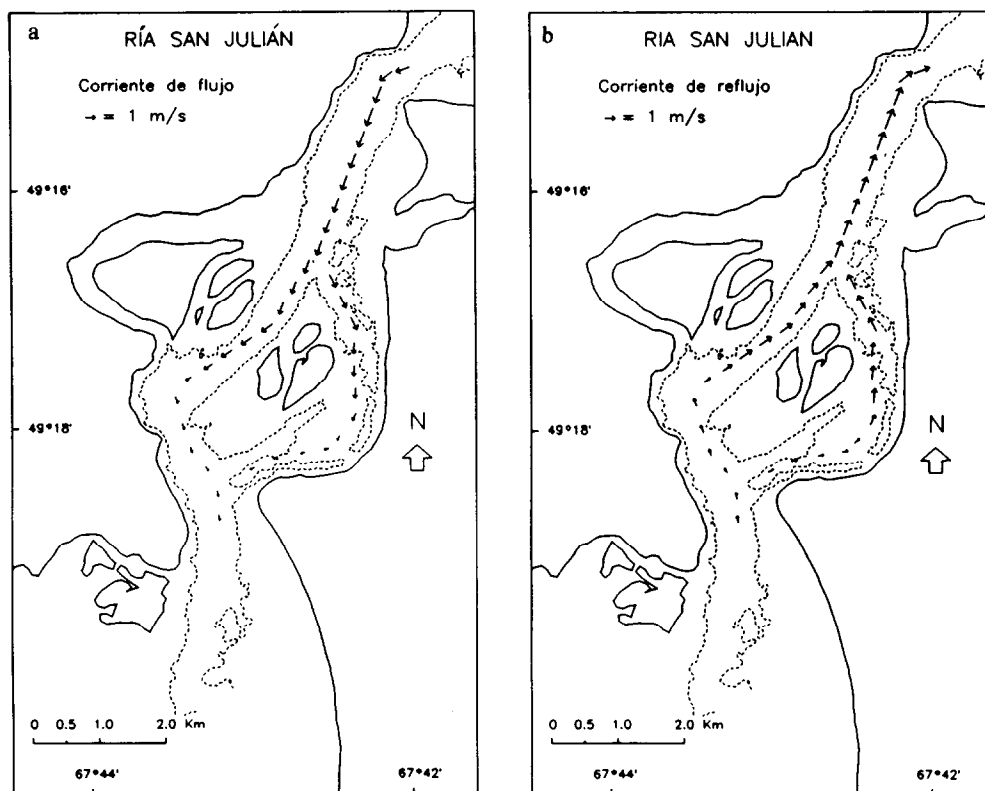
Las estoas (intervalos de tiempo en los cuales la corriente cambia su sentido y su velocidad es cero) ocurren simultáneamente en todo el recinto modelado, aproximadamente 45 min después de la pleamar y 60 min después de la bajamar.

Con el objeto de analizar la correspondencia entre la marea y las corrientes observadas y predichas, se realizó el análisis armónico de la marea predicha para la estación de marea I y de la corriente predicha para la estación de corriente II. Los resultados se presentan en la tabla I. Las

intensidad gradualmente disminuye alcanzando valores de 0.5 m/s en la estación de corriente I.

Slacks (time intervals in which a tidal current becomes zero and changes its direction) occur simultaneously in the entire modeled area, approximately 45 min after high water and 60 min after low water.

In order to further analyze the relationship between the observed and predicted tide and currents, harmonic analyses were carried out for the predicted sea level at tide station I, and for the predicted current velocity at current station II. The results of the harmonic analyses are shown in table I. The predicted amplitude for the  $K_1$ ,  $M_2$  and  $M_4$  constituents at tide station I are about 100.0, 100.3 and 162.5% of the observed ones, respectively. The ratios of the  $K_1$ ,  $M_2$  and  $M_4$  constituents of the predicted cur-



**Figura 5.** Diagramas de circulación obtenidos para las situaciones de flujo (a) y reflujo (b).  
**Figure 5.** Calculated flow patterns for flood (a) and ebb (b) currents.

**Tabla 1.** Amplitudes resultantes del análisis armónico de los valores predichos y observados de la marea, en la estación I, y de las velocidades de la corriente en la estación de corriente II para los componentes  $K_1$ ,  $M_2$  y  $M_4$ .

**Table 1.** Amplitudes resulting from the harmonic analyses of the predicted and observed tidal levels at tide station I, and current velocities at current station II for the  $K_1$ ,  $M_2$  and  $M_4$  constituents.

Componente	Marea (cm)		Corriente (cm/s)	
	Observada	Predicha	Observada	Predicha
$K_1$	27.0	27.0	10.0	5.7
$M_2$	288.9	289.8	148.4	120.7
$M_4$	10.4	16.9	27.5	33.9

amplitudes obtenidas con los valores predichos por el modelo para las componentes  $K_1$ ,  $M_2$  y  $M_4$  en la estación de marea I representan el 100.0, 100.3 y 162.5% de las correspondientes a los datos medidos, respectivamente. Los cocientes entre los valores predichos y observados de las componentes  $K_1$ ,  $M_2$  y  $M_4$  de la corriente son de 0.57, 0.81 y 1.23, respectivamente.

## CONCLUSIONES

El modelo se forzó con la marea y las corrientes observadas y reprodujo los aspectos más importantes de la circulación de la ría San Julián. En concordancia con la información de campo, el modelo predijo razonablemente bien la diferencia en fase entre la marea y la corriente. Considerando que el modelo implementado predice velocidades de corriente promediadas sobre la sección transversal del canal, los resultados obtenidos pueden considerarse muy buenos. Finalmente, este modelo se podría utilizar para evaluar el impacto de las decisiones de manejo.

## REFERENCIAS

- Amein, M. and Fang, C.S. (1970). Implicit flood routing in natural channels. **J. Hydraulics Division**, ASCE, 96(HY12): 2481-2500.
- Botev, I.B. (1991). One-dimensional numerical modeling of dam-break wave propagation in mild sloping natural streams. **J. Hydroscience and Hydraulic Engineering**, Japan Society of Civil Engineers, 9(1): 27-42.
- Davis, J.C. (1986). **Statistics and Data Analysis in Geology**, John Wiley and Sons, New York.
- Dronkers, J.J. (1975). Tidal theory and computations. In: Ven Te Chow (ed.), **Advances in Hydroscience**, Vol. 10, Academic Press, New York, pp. 145-230.
- Fread, D.L. and Smith, G.F. (1978). Calibration technique for 1-D unsteady flow models. **J. Hydraulics Division**, 104(HY7): 1027-1043.
- Godin, G. (1972). **The Analysis of Tides**, Liverpool University Press, 264 pp.
- rents to the amplitude of the observed ones are 0.57, 0.81, and 1.23, respectively.

## CONCLUSIONS

The model was forced with observed tide and currents and reproduced the major aspects of the water circulation of the Ría San Julián. In accordance with field measurements, the model predicted the difference in phase between tide and currents reasonably well. Despite the fact that the implemented model predicts only averaged values of current velocities over a cross section, the obtained results can be considered as very good. Lastly, the model might be used to assess the impact of management decisions.

English translation by the authors.

- 
- Harleman, D.R.F. and Lee, C.H. (1969). The computation of tides and currents in estuaries and canals. **US Army Corps of Engineers, Technical Bull.**, No. 16.
- Henderson, F.M. (1966). **Open Channel Flow**, MacMillan Company, New York, 552 pp.
- Mazio, C.A. y D'Onofrio, E.E. (1989). La onda de marea en San Julián. **Servicio de Hidrografía Naval**, informe técnico 52-89, 30 pp.
- Meselhe, E.A. and Holly Jr., F.M. (1993). Simulation of unsteady flow in irrigation canals with dry bed. **J. Hydraulic Engineering**, 119(9): 1021-1039.
- Pujol, A. y Menéndez, A. (1987). **Análisis unidimensional de escurrimiento en canales**, Editorial Universitaria de Buenos Aires, Buenos Aires, 90 pp.
- Servicio de Hidrografía Naval (1991). **Derrotero argentino, parte II: Costa del Atlántico**. Publ. H602, SHN 457 pp.
- Servicio de Hidrografía Naval (1992). **Carta náutica H364**. SHN Armada Argentina.
- Schaffranek, R.W. and Baltzer, R.A. (1980). A one-dimensional model of the Potomac River. **Proceedings of the Specialty Conference on Computer and Physical Modeling in Hydraulic Engineering**, ASCE: 292-309.