

SISTEMA HIDROBID II PARA SIMULAR CORRIENTES EN CUENCOS

A.N. MENENDEZ

*Departamento de Hidráulica Computacional
Laboratorio de Hidráulica Aplicada (LHA)
INCYTH
Ezeiza - Argentina*

RESUMEN

Se presenta el sistema computacional HIDROBID II, que se utiliza para simular flujos cuasi-bidimensionales a superficie libre. Está basado en la resolución numérica de las ecuaciones para aguas poco profundas. Se utiliza un método implícito de direcciones alternadas. El sistema puede simular contornos externos cerrados (costa) y abiertos (entrante, saliente y libre), y bordes internos (obstáculos unidimensionales que representan ataguías, espigones, etc.) eventualmente combinados con singularidades como fuentes y sumideros que representan estructuras (vertederos, alcantarillas, etc.). Se presentan varias aplicaciones.

SUMMARY

The computational system HIDROBID II for the simulation of nearly-two-dimensional free surface flows is presented. It is based on the numerical resolution of the shallow-water equations. An alternating direction implicit method is used. The system may simulate external closed (coastal line) and open boundaries (inflow, outflow, free boundaries), and internal boundaries (one-dimensional obstacles representing cofferdam, breakwaters, etc.) eventually combined with singularities like sources and sinks representing structures (spillways, culverts, etc.). Several applications are presented.

INTRODUCCION

La simulación numérica de problemas de ingeniería hidráulica es una técnica cuyo campo de aplicación gana terreno día a día, gracias, sobre todo, a los avances en materia de equipos de computación y de métodos numéricos. De hecho se está forjando una nueva disciplina —la Hidráulica Computacional— basada en los conocimientos teóricos y empíricos adquiridos a través de la utilización práctica de este tipo de herramientas.

El objetivo de la Hidráulica Computacional es la construcción e implementación de algoritmos capaces de simular fenómenos hidráulicos. Esto comprende el desarrollo de sistemas computacionales confiables y robustos, capaces de ser utilizados como herramientas de diseño asistido por computadora. Cada sistema se dirige a una familia particular de problemas.

Recibido: Marzo 1989

El LHA tiene una larga experiencia en el desarrollo de este tipo de sistemas, dirigidos a resolver problemas de propagación de ondas en canales, corrientes en cuencos, olas y corrientes en zonas costeras, transporte de contaminantes, etc. En el presente trabajo se presenta el sistema HIDROBID II, que describe las corrientes que se producen en un cuenco cuando predominan los movimientos de gran escala en el plano horizontal.

MODELO TEORICO Y ECUACIONES DE GOBIERNO

El conjunto de hipótesis que definen el modelo teórico para un flujo cuasi-bidimensional a superficie libre puede ser estructurado en tres categorías, de acuerdo a como restringen sendos factores, a saber:

- (i) Fuerzas actuantes:
 - (a) Las fuerzas motrices son la gravedad, la fuerza de inercia debida a la rotación de la Tierra (Coriolis) y las fuerzas superficiales debidas a la acción del viento.
 - (b) La resistencia al movimiento proveniente de la generación de turbulencia en el fondo puede ser expresada usando una ley similar a la del escurrimiento permanente unidimensional (ley de Chezy).
- (ii) Geometría del cuenco:
 - (a) La forma del fondo es arbitraria, pero no cambia con el tiempo y no presenta variaciones bruscas.
 - (b) La pendiente del fondo es pequeña.
- (iii) Condiciones del flujo:
 - (a) El flujo es cuasi-bidimensional, es decir es esencialmente bidireccional y la velocidad es prácticamente uniforme en la dirección normal a la superficie del escurrimiento.
 - (b) La componente de la aceleración normal al escurrimiento es despreciable frente a la aceleración de la gravedad. Esto significa que la curvatura y divergencia de las líneas de corriente en planos normales a la superficie del escurrimiento son pequeñas. Como consecuencia, la distribución de presiones es esencialmente hidrostática.

Si se parte de las ecuaciones de Navier-Stokes, se las promedia en el sentido de Reynolds, se las integra sobre la vertical y se efectúan las simplificaciones que permiten las hipótesis expuestas, se obtienen las ecuaciones para aguas poco profundas (o ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones espaciales)^{1,2}:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) - fvh + gh\frac{\partial}{\partial x}(h+z_0) + \quad (2)$$

$$+ \frac{\tau_{fx}}{\rho} - \frac{\tau_{sx}}{\rho} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{xx}) - \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{xy}) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2) + \frac{\partial}{\partial x}(huv) + fuh + gh\frac{\partial}{\partial y}(h+z_0) + \quad (3)$$

$$+ \frac{\tau_{fy}}{\rho} - \frac{\tau_{sy}}{\rho} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{yy}) - \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{xy}) = 0$$

donde t es el tiempo, x e y las coordenadas según la horizontal, u y v las componentes de la velocidad media en la vertical a lo largo de los ejes x e y , respectivamente, h la profundidad, f el parámetro geotrófico, g la gravedad, ρ la densidad, τ_{fx} y τ_{fy} las componentes de la tensión de corte contra el fondo, τ_{sx} y τ_{sy} las componentes de la tensión de corte contra la superficie libre (viento) y τ_{xx} , τ_{xy} y τ_{yy} las tensiones efectivas, que contienen contribuciones viscosas, turbulentas (tensiones de Reynolds) y convectivas (asociadas a la no uniformidad vertical de la velocidad).

Estas ecuaciones deben ser complementadas con adecuadas condiciones iniciales y de contorno. Siendo de primer orden en el tiempo, es necesario especificar inicialmente las distribuciones de h , u y v . En el caso en que las tensiones efectivas pueden despreciarse, el sistema de ecuaciones es hiperbólico. La aplicación del método de las características³ muestra entonces que debe especificarse el siguiente número de condiciones de contorno, de acuerdo al tipo de contorno y al régimen de flujo normal a ese contorno:

- Contorno entrante - flujo subcrítico : 2
- Contorno entrante - flujo supercrítico : 3
- Contorno costa (flujo subcrítico) : 1
- Contorno saliente - flujo subcrítico : 1
- Contorno saliente - flujo supercrítico : 0

Si se producen zonas de recirculación (desprendimiento de la capa límite adyacente a la costa) donde las tensiones efectivas se hacen significativas, el carácter de las ecuaciones puede cambiar localmente, siendo necesario entonces especificar condiciones adicionales.

ESQUEMA NUMERICO

El esquema numérico utilizado se basa en el método de las diferencias finitas. Usa una malla de discretización espacial alternada, es decir, las variables h , u y v

están centradas en puntos diferentes. Esto resulta conveniente para aplicar algunas condiciones de contorno.

Se utiliza un método implícito de direcciones alternadas. Los términos convectivos se descentran (esquema de aguas arriba) para lograr mayor estabilidad. Agregando adecuados términos "fuente" se consigue obtener un orden de precisión 2 en el espacio y, para problemas en régimen estacionario, una forma conservativa en el límite de tiempos largos. La no linealidad se resuelve mediante una técnica iterativa. Por ejemplo, la ecuación de continuidad, ecuación (1), que se centra en los nodos h , se escribe, para el primer paso fraccionario (derivadas implícitas según x y explícitas según y), y suponiendo que ambas componentes de la velocidad son positivas, como

$$\begin{aligned}
 & \frac{h_{ij}^{n+1/2} - h_{ij}^n}{\Delta t/2} + u_{i-1/2j}^{n+1/2*} \left(\frac{h_{ij}^{n+1/2} - h_{i-1j}^{n+1/2}}{\Delta x} \right) + h_{ij}^{n+1/2*} \left(\frac{u_{i+1/2j}^{n+1/2} - u_{i-1/2j}^{n+1/2}}{\Delta x} \right) = \\
 & = u_{i-1/2j}^{n+1/2*} \left(\frac{h_{ij}^{n+1/2*} - h_{i-1j}^{n+1/2*}}{\Delta x} \right) + h_{ij}^{n+1/2*} \left(\frac{u_{i+1/2j}^{n+1/2*} - u_{i-1/2j}^{n+1/2*}}{\Delta x} \right) - \\
 & \frac{1}{2\Delta x} \left[u_{i+1/2j}^{n+1/2*} \left(h_{ij}^{n+1/2*} + h_{i+1j}^{n+1/2*} \right) - u_{i-1/2j}^{n+1/2*} \left(h_{i-1j}^{n+1/2*} + h_{ij}^{n+1/2*} \right) \right] - \\
 & - \frac{1}{2\Delta x} \left[v_{ij+1/2}^n \left(h_{ij}^n + h_{ij+1}^n \right) - v_{ij-1/2}^n \left(h_{ij-1}^n + h_{ij}^n \right) \right]
 \end{aligned} \tag{4}$$

donde i, j son los índices en las direcciones x e y , respectivamente, y n el paso de cálculo temporal. Los términos identificados con el asterisco son los que se actualizan luego de cada iteración.

Las ecuaciones de cantidad de movimiento en las direcciones x (ecuación (2)) e y (ecuación (3)) se centran en los nodos u y v , respectivamente. En el primer paso fraccionario, entonces, la primera de ellas queda acoplada con la ecuación de continuidad, determinando un sistema de ecuaciones algebraicas lineales de tipo tridiagonal en bloque. La segunda, por su parte, constituye un sistema tridiagonal. Ambos sistemas pueden ser resueltos rápida y eficientemente por algoritmos de eliminación. La situación es totalmente similar en el segundo paso fraccionario.

Este esquema resulta eficiente desde el punto de vista computacional y adecuado en cuanto a precisión. Si bien es incondicionalmente estable, desde el punto de vista lineal, las variaciones bruscas de la topografía del fondo lo tornan sólo condicionalmente estable, debiendo limitarse el paso de cálculo temporal. No obstante, resulta más robusto que los métodos explícitos.

BORDES EXTERNOS E INTERNOS

El tratamiento adecuado de los bordes externos (es decir, los que limitan el dominio de cálculo) e internos (estructuras) es fundamental para garantizar la estabilidad del esquema numérico. Hay que tener en cuenta que en los bordes externos, además de las condiciones de contorno "físicas", deben imponerse condiciones de contorno "numéricas" sobre las variables libres, de modo de cerrar el planteo. Estas condiciones deben ser tales que su influencia sobre la solución sea débil y se extienda sobre unas pocas celdas. Para el presente problema se utilizaron condiciones de Neumann homogéneas sobre las variables libres.

Una de las claves para disponer de un sistema computacional versátil, es decir, aplicable a una amplia variedad de problemas prácticos, es poder simular distintos tipos de bordes. Los bordes externos pueden ser cerrados o abiertos. La representación de los bordes cerrados (típicamente las costas) no presenta dificultades. Sobre ellos se aplica la condición de impenetrabilidad (velocidad normal nula). A escala geofísica no es, en general, necesario considerar la capa límite adyacente a las costas, por lo cual la condición de Neumann homogénea sobre la velocidad tangencial es adecuada ya que implica aceptar un desplazamiento libre sobre el contorno.

Los bordes abiertos pueden ser de diversos tipos. La influencia de afluentes se tiene en cuenta a través de bordes entrantes donde se especifican el caudal aportado y la dirección de entrada de la corriente (la distribución del caudal a lo ancho del cauce puede realizarse automáticamente). En un borde por donde penetra una onda de marea se especifica el nivel, como función del tiempo, y, en la parte del ciclo durante la cual penetra agua, la dirección de la corriente. En los bordes abiertos "libres" se da una relación entre el nivel y el caudal (curva altura-caudal) si los movimientos son de gran escala (onda cinemática), o se especifica el flujo de base y se impone la constancia del invariante de Riemann ("condición de borde no reflejante") cuando los movimientos son de escala pequeña (ondas de gravedad).

Las estructuras se representan como bordes internos a través de los cuales se produce algún tipo de discontinuidad en las variables del flujo (esa discontinuidad manifiesta la imposibilidad de resolver las escalas de movimiento asociadas a ese fenómeno). En general, se define un contorno unidimensional impenetrable y, en caso de que se trate de una estructura que eroga agua de acuerdo a una determinada ley, una serie de pares sumidero-fuente cuya intensidad está en relación a esa ley. De esta manera se han representado espigones, ataguías, brechas, vertederos, alcantarillas, puentes, etc.

SISTEMA HIDROBID II

El procedimiento de cálculo descrito ha sido implementado en el sistema computacional HIDROBID II, que se ha constituido en una de las herramientas más importantes para los estudios de ingeniería hidráulica encarados por el LHA. El sistema contiene un preprocesador (programa PIP⁴) para generar una red con la geometría y la topografía del cuenco a partir de datos de campo. Estos, en general, están constituidos

por datos planialtimétricos dispersos, los cuales son leídos por medio de un digitalizador. Mediante técnicas de ajuste se obtienen valores representativos de altura en cada uno de los nodos de la malla de cálculo, y se determina si la celda está o no cubierta de agua (lo cual define la geometría).

El programa principal, además de utilizar la información geométrica y topográfica, requiere la definición de parámetros numéricos, la identificación de los tipos de contornos abiertos y de estructuras presentes, y genera o lee las condiciones iniciales. Los resultados básicos consisten en las distribuciones espaciales, en instantes especificados, de la altura y las dos componentes de la velocidad, y su evolución temporal en puntos especificados.

Finalmente, un posprocesador (programa AMIGA) representa los resultados gráficamente (curvas de nivel de la superficie libre, campo de velocidades, líneas de corriente, distribuciones en cortes longitudinales, etc.).

APLICACIONES

El sistema HIDROBID II, cuya primera versión fue implementada en 1985^{5,6}, ha sido utilizado en una variedad de estudios de ingeniería hidráulica, en el marco de proyectos contratados con empresas públicas y privadas.

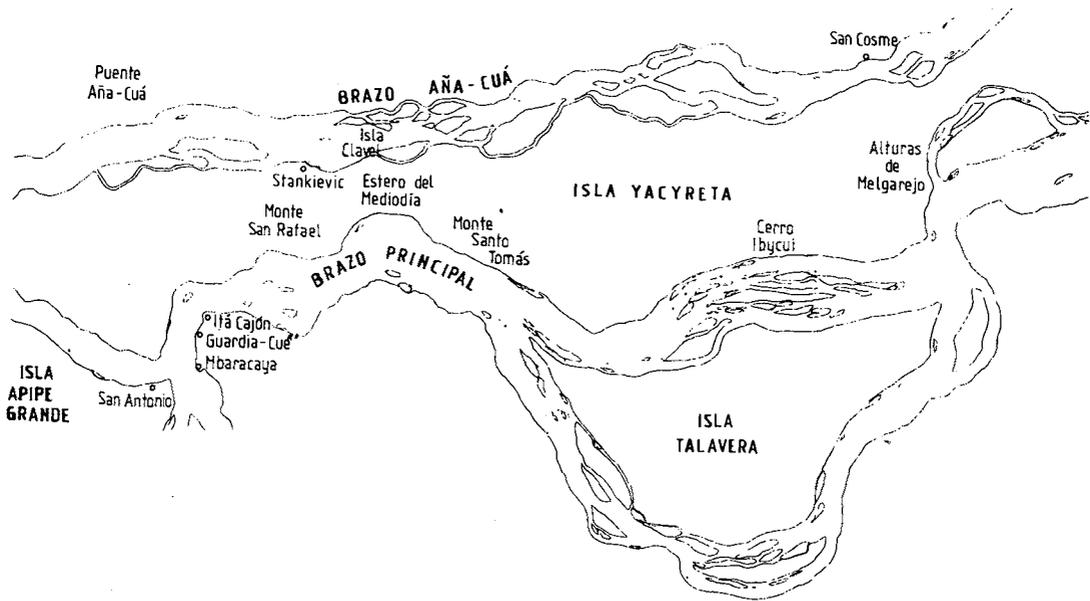
El primer estudio se realizó en relación al emprendimiento hidroeléctrico de Corpus^{7,8}, a pedido de la Comisión Argentino-Paraguaya del Río Paraná. Se determinó que la curva que el río presenta aguas arriba de la zona de emplazamiento de la obra no produce efectos significativos sobre el escurrimiento en esa zona, por lo cual podía utilizarse sin reparos el modelo físico (de 50 x 100 m) construido en el LHA.

Bajo contrato con el consorcio internacional ERIDAY-UTE, constructores de la presa de Yaciretá, se implementó un modelo matemático para determinar el trasvase de agua desde el Brazo Principal al Brazo Añá-Cuá del Río Paraná durante la etapa de construcción de la obra⁹ (Figura 1). Se puso en evidencia que el caudal de trasvase era significativo, lo cual condujo a replanteos en cuanto a la estrategia de cierre del Brazo Añá-Cuá. Esto dio lugar a nuevos estudios (en ejecución) sobre un modelo matemático ampliado para simular ese cierre, en combinación con un modelo físico de detalle.

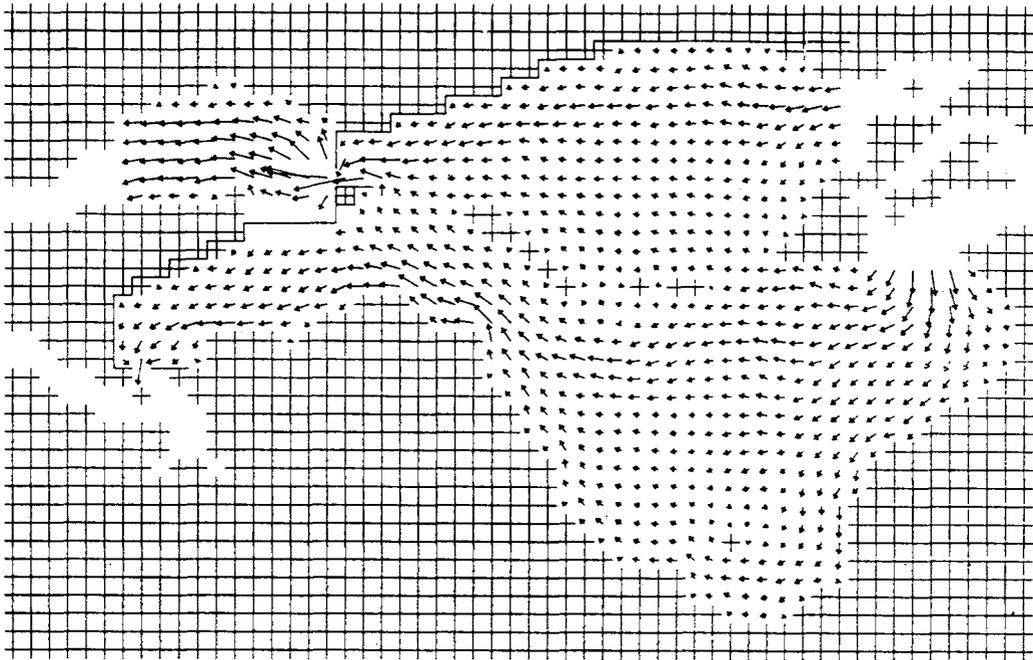
Como proyecto interno del LHA se llevó a cabo la modelación de la totalidad del Río de la Plata, estudiándose los efectos de las mareas y del viento^{10,11,12} (Figura 2).

A través de un contrato con Obras Sanitarias de la Nación, se está estudiando el nivel de contaminación en el Río de la Plata producido por la descarga de los efluentes cloacales en la zona de Berazategui^{13,14}. En este caso, el sistema HIDROBID II provee las condiciones hidrodinámicas (Figura 3) para un modelo de transporte de contaminantes (sistema MANCHA¹⁵).

A requerimiento del INTA y de los productores de la zona del Delta del Paraná, se está llevando a cabo una simulación del escurrimiento en condiciones de crecida extraordinaria para la totalidad del Delta, de modo de ensayar la efectividad de algunas obras de protección (Figura 4).

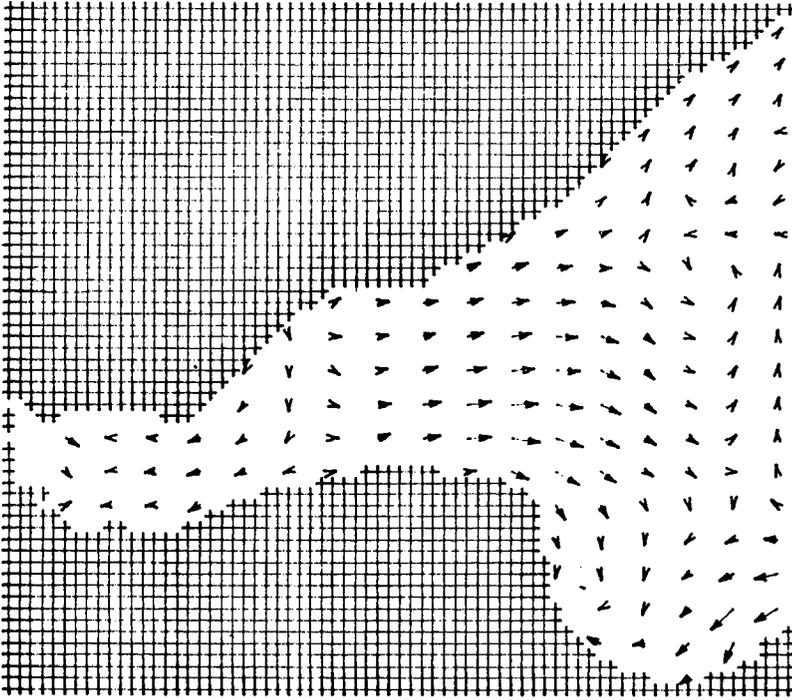


a) Mapa de la zona

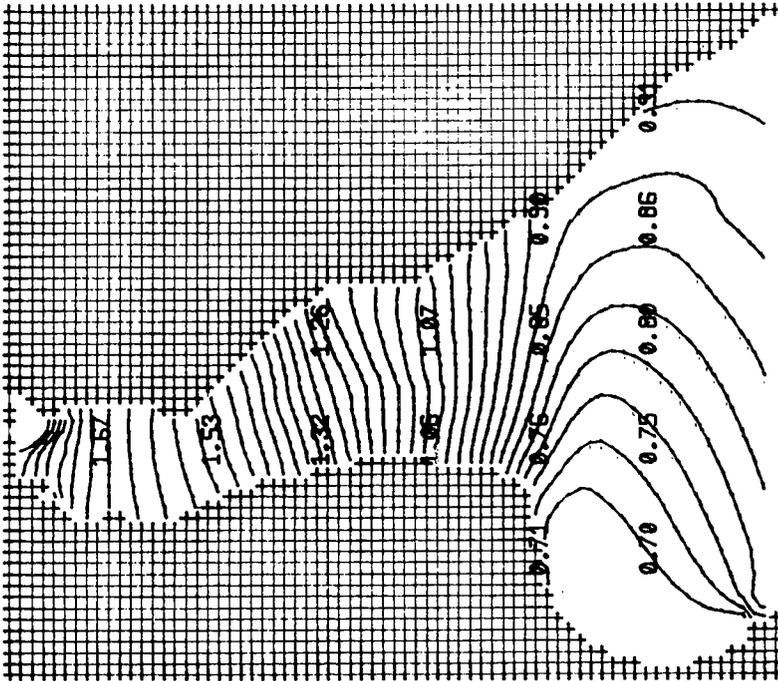


b) Simulación en régimen de crecida

Figura 1. Modelo matemático del Río Paraná en la zona de Yaciretá.

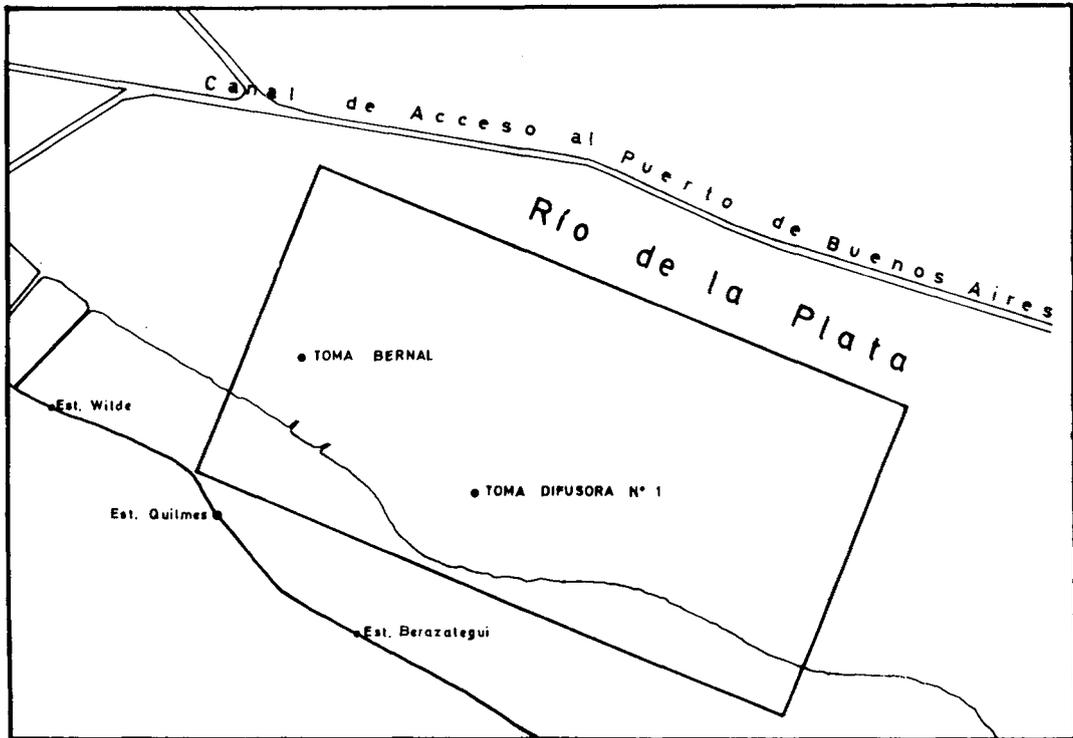


b) Campo de velocidades

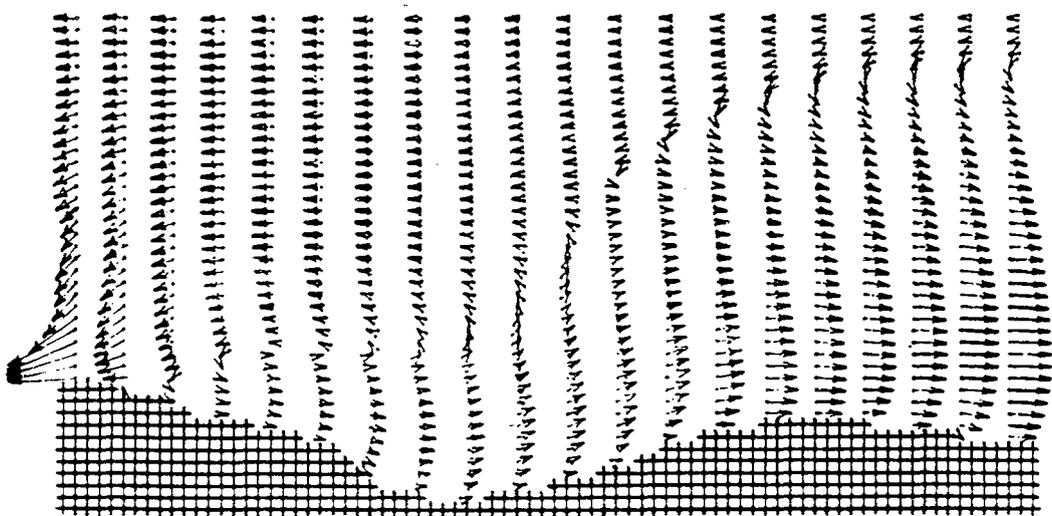


a) Líneas de isonivel de la superficie libre.

Figura 2. Modelo matemático del Río de la Plata



a) Mapa de la zona



b) Corrientes durante el comienzo de un bajamar

Figura 3. Modelo matemático de las corrientes de Berazategui (Río de la Plata).

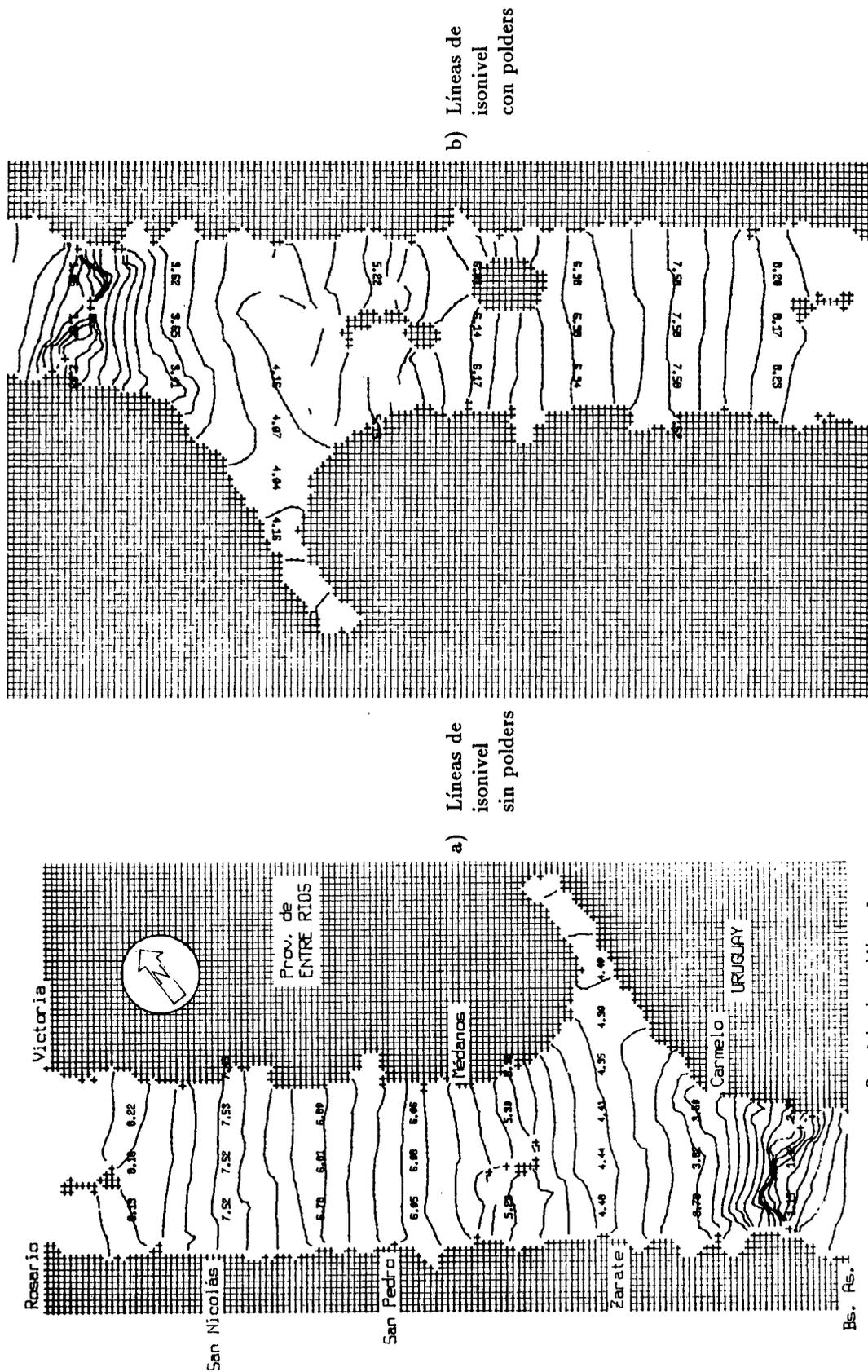


Figura 4. Modelo matemático del Delta del Paraná.

COMENTARIOS FINALES

Las aplicaciones han puesto en evidencia que el sistema HIDROBID II es robusto y confiable. Su gama de aplicaciones crece día a día, debiéndosele incorporar, entonces, nuevos mecanismos físicos y/o nuevas fórmulas hidráulicas. Actualmente consiste en una serie de versiones adaptadas, cada una de ellas, a cierta familia de problemas.

Si bien el sistema HDROBID II comienza a desplazar a los modelos físicos de algunos estudios en los cuales su utilización era típica, se está desarrollando una nueva idea de complementareidad entre los modelos físicos y matemáticos. En efecto, los primeros aún tienen mucho que aportar en estudios de detalle, donde intervienen mecanismos físicos complicados (básicamente asociados a la turbulencia) sobre los cuales se conoce poco en términos teóricos. En estos casos, los modelos matemáticos, representando los movimientos de mayor escala, pueden proveer adecuadas condiciones de borde a la simulación física.

REFERENCIAS

1. J.J. Leendertse, "Aspects of a Computational Model for Long-Period Water-Wave Propagation", *Rand Memorandum RM-5294-PR*, (1967).
2. C. Flokstra, "The Closure Problem for Depth-Averaged Two-Dimensional Flow", *XVII Congress of the Interational Association for Hydraulic Research*, Baden-Baden, (1977).
3. A. Daubert y M.O. Graffe, "Quelques aspects des écoulements presque horizontaux a deux dimensions en plan et non permanents. Application aux estuaires", *La Houille Blanche*, Vol. 8, (1967).
4. C. Vionnet, "PIP-Sistema computacional para el procesamiento de información planialtimétrica", *Informe LHA-INCYTH 064-01-86*, (1987).
5. A.N. Menéndez, "Simulación numérica de flujos cuasi-dimensionales a superficie libre", *Informe LHA-INCYTH S5-016-85*, (1985).
6. A.N. Menéndez y R. Funai, "Resolución numérica de las ecuaciones para flujo cuasi-bidimensional a superficie libre", *I Congreso Argentino de Mecánica Computacional y VI Congreso Latinoamericano de Métodos Computacionales en Ingeniería, MECOM 85*, Paraná, Argentina, (1985).
7. A.N. Menéndez, "Estudio del escurrimiento en la zona de Corpus con un modelo matemático", *Informe LHA-INCYTH 053-01-85*, (1985).
8. A.N. Menéndez, "Estudio del escurrimiento en la zona de Corpus con un modelo matemático. Informe complementario", *Informe LHA-INCYTH 053-02-85*, (1985).
9. A.N. Menéndez, "Estudio del trasvase entre los brazos del Río Paraná a través de la Isla Yaciretá con un modelo matemático", *Informe LHA-INCYTH 073-01-87*, (1987).
10. G.N. Molinari, "Simulación numérica de la circulación en el Río de la Plata", *Trabajo de Seminario para la Licenciatura en Oceanografía*, ITBA, (1986) (*Informe LHA-INCYTH S5-017-86*).
11. J. Albarracín, "Análisis de la hidrodinámica del Río de la Plata a partir de una simulación numérica", *Trabajo de Seminario para la Licenciatura en Oceanografía*, ITBA, (1987) (*Informe LHA-INCYTH 065-001-88*).
12. A.M. Olalde, "Simulación numérica de corrientes de deriva en el Río de la Plata", *Trabajo de Seminario para la Licenciatura en Oceanografía*, ITBA, (1988), (*Informe LHA-INCYTH 065-002-88*).

13. P.E. Carreras y A.N. Menéndez, "Proyecto de tratamiento y disposición de efluentes domésticos del Gran Buenos Aires. Modelo matemático hidrodinámico", *Informe LHA-INCYTH 070-002-87*, (1987).
14. P.E. Carreras y A.N. Menéndez, "Proyecto de tratamiento y disposición de efluentes domésticos del Gran Buenos Aires. Modelos matemáticos de dispersión de contaminantes", *Informe LHA-INCYTH 070-003-88*, (1988).
15. A.N. Menéndez, "Simulación numérica de la dispersión de contaminantes en regiones localizadas", *Informe LHA-INCYTH 066-01-86*, (1986).