



EZEIZA V: UN PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA REDES DE CANALES

Angel N. Menéndez

INCYTH-Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente Humano
C.C. 21, 1802 Aerop. Ezeiza, Argentina

RESUMEN

Se describen aspectos de la implementación computacional de un modelo matemático hidrodinámico para una red de canales, previa presentación del modelo y del método numérico de resolución utilizado. Se muestran resultados de su aplicación al proyecto de sistematización de la cuenca del río Reconquista (Prov. de Buenos Aires). El programa computacional resultante, denominado *EZEIZA V*, constituye una herramienta apta para ser utilizado en prácticamente cualquier situación de interés ingenieril.

ABSTRACT

Aspects of the computational implementation of a hydrodynamic mathematical model for a flow net are described. Previously, the model and the used numerical method are presented. Results of its application to the sistematization project of Reconquista River basin (Province of Buenos Aires) are shown. The resulting computational program, named *EZEIZA V*, constitutes an appropriate tool to be used for practically any situation of engineering interest.

INTRODUCCION

El problema del escurrimiento fluvial en red, típicamente en la zona de delta que se forma cerca de la desembocadura de los ríos, ha sido pionero en el proceso de desarrollo de modelos numéricos para uso en la ingeniería hidráulica. Esto ha conducido a la producción de software relativamente sofisticado para dar cuenta de una gran cantidad de detalles del escurrimiento: ocupación de planicies de inundación durante las crecidas, implementación de estructuras de control (compuertas, esclusas, vertederos) y de obras de aprovechamiento (presas de embalse), aportes laterales puntuales o distribuidos, pérdidas locales (curvas, expansiones, contracciones).

En el INCYTH se ha venido trabajando en esta línea de desarrollo desde la década del 70, a través de la serie de programas denominada *EZEIZA*: el *EZEIZA III* [1] es el primer modelo de aplicación; con el *EZEIZA IV* [2] se produce un software amigable sobre computadoras "main-frame", que fue distribuido en varias universidades; finalmente, el *EZEIZA V* es la culminación del desarrollo, tratándose de un programa sofisticado que incorpora todas las opciones de simulación necesarias para encarar los problemas que presenta el escurrimiento en red.

En este trabajo se presenta el modelo matemático del escurrimiento en el que se basa el *EZEIZA V*, se

describe el algoritmo de resolución numérica y se muestra una aplicación.

MODELO MATEMATICO

El modelo matemático hidrodinámico *EZEIZA V* se basa en un análisis unidimensional. En este marco teórico, el escurrimiento se caracteriza, en cada sección transversal de flujo, identificada por su progresiva x , y en cada instante t , por medio del nivel de agua z (supuesto constante a través de la sección) o el tirante h (profundidad del talweg) y el caudal Q que la atraviesa.

El modelo está basado en las Ecuaciones de Saint Venant [3,4], que constituyen la representación matemática de los principios de conservación de la Mecánica: masa (continuidad) y cantidad de movimiento (longitudinal). Estas son:

$$B \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{\Omega} + \frac{g}{2} \Sigma \right) = g \Omega (I_0 - I_f) + \frac{g}{2} \gamma + q u_L \quad (2)$$

donde B es el ancho superficial, Ω el área de la sección transversal, I_0 la pendiente del fondo, I_f la pendiente de fricción, q el aporte lateral entrante por unidad de longitud, u_L la componente longitudinal de la velocidad del aporte lateral, g la aceleración de la gravedad, $\Sigma = 2 h_{ce} \Omega$ el momento areal (h_{ce} es el centroide de la sección) y γ el coeficiente de divergencia definido como

$$\gamma \equiv \frac{\partial \Sigma}{\partial x} \Big|_{h=cte} \quad (3)$$

Las ecuaciones (1)-(2) forman un sistema hiperbólico de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, que representan la evolución de ondas superficiales en aguas poco profundas [5,6].

El sistema de ecuaciones diferenciales está complementado por condiciones iniciales y de contorno. En régimen subcrítico (número de Froude $Q/\Omega/\sqrt{gh} < 1$), que es el caso típico de una red de canales, se especifican como condiciones de borde los niveles o caudales instantáneos en los contornos de ingreso al sistema y los niveles o las relaciones altura-caudal en las desembocaduras. Como condiciones iniciales, deben proveerse las distribuciones de nivel y caudal sobre todo el sistema (en la práctica, esta condición se calcula planteando el problema estacionario).

Tratándose de una red de canales, también aparecen condiciones de borde internas en los puntos de ramificación. Allí se plantea la continuidad del caudal y la conservación de la energía mecánica, excepto por las pérdidas locales, si las hubiere.

En el caso de representarse la presencia de estructuras (puentes, alcantarillas, compuertas, vertederos) o transiciones (expansiones, contracciones) surgen condiciones de contorno internas adicionales: continuidad del caudal y ley de funcionamiento hidráulico (que, por ejemplo, relaciona el caudal pasante con la diferencia de nivel de agua que se produce al atravesar la estructura) [2,3].

RESOLUCION NUMERICA

La resolución del sistema de ecuaciones de Saint Venant se lleva a cabo a través de métodos

numéricos. Para régimen subcrítico, como en el presente caso, uno de los esquemas numéricos más eficientes es el de Preissmann [2,7]. Este es un método implícito de diferencias finitas, que vincula las variables del escurrimiento pertenecientes a dos secciones de cálculo adyacentes (j y $j+1$) y dos pasos temporales de cálculo sucesivos (n y $n+1$). Para una variable genérica f se utilizan las siguientes aproximaciones de las funciones y de sus derivadas:

$$f(x_j) = \theta f_j^{n+1} + (1-\theta) f_j^n \quad (4)$$

$$f(x, t^n) = \frac{1}{2} (f_j^n + f_{j+1}^n) \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} f(x, t) = \frac{(f_{j+1}^{n+1} - f_{j+1}^n) + (f_j^{n+1} - f_j^n)}{2\Delta t} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} f(x, t) = \frac{\theta (f_{j+1}^{n+1} - f_j^{n+1}) + (1-\theta) (f_{j+1}^n - f_j^n)}{\Delta x} \quad (7)$$

donde Δt y Δx son los pasos temporal y espacial de discretización, respectivamente. El factor θ es el peso relativo asignado a la información correspondiente al nuevo paso de tiempo. Su elección depende del tipo de problema bajo consideración: en el caso de estudiarse ondas de marea (número de Courant $[Q/\Omega + \sqrt{gh}] \Delta t / \Delta x$ de orden 1) puede elegirse $\theta=0.5$ (Crank-Nicolson); pero cuando se simulan ondas de inundación se toman valores algo superiores ($\theta=0.7$) para mejorar las características de estabilidad y así poder utilizar números de Courant mayores. Precisamente, el carácter implícito del método numérico permite propagar en forma eficiente las ondas de inundación (que son las más largas dentro del espectro de ondas en aguas poco profundas), ya que evita la condición de estabilidad de Courant, permitiendo la utilización de pasos temporales de cálculo sólo limitados por la precisión requerida.

La implementación de las condiciones de borde externas es trivial en el caso de tratarse de condiciones de Dirichlet. Cuando se utilizan relaciones altura-caudal debe recurrirse a un método iterativo.

En el caso de las condiciones de borde internas en los puntos de ramificación o en las estructuras, se efectúa una bifurcación del nodo de cálculo. Por ejemplo, para las últimas se plantea

$$Q_- = Q_+ \quad (8)$$

$$Q_- = F(z_{j-}, z_{j+}) \quad (9)$$

donde F es una función que representa la ley hidráulica de esa estructura y que depende de los parámetros de la estructura a ser especificados como datos de entrada.

La discretización de las ecuaciones diferenciales, combinadas con las condiciones de contorno externas e internas, conduce a un sistema de ecuaciones algebraico no lineal, para cada paso de tiempo, para las dos variables incógnita (nivel y caudal), que es resuelto mediante una técnica iterativa especialmente desarrollada. Esta consiste en resolver, en cada paso, un sistema lineal tipo banda (tridiagonal en bloque), para lo cual los coeficientes inicialmente fuera de la banda (resultantes de la existencia de puntos de ramificación) son trasladados al término independiente.

En caso de acercarse a las condiciones críticas de escurrimiento, es necesario recurrir a métodos numéricos especiales [8].

PROGRAMA EZEIZA V

El programa EZEIZA V plantea una descripción topológica de la red de escurrimiento en términos de *filamentos*. Estos filamentos pertenecen a una de las siguientes cuatro categorías:

- Tipo 1:* Comienza y termina en bordes abiertos, donde se especifican las condiciones de borde adecuadas.
- Tipo 2:* El filamento es abierto aguas arriba, donde se especifica la condición de contorno, pero culmina en otro filamento.
- Tipo 3:* El filamento nace en otro filamento y es abierto aguas abajo, donde se especifica la condición de borde.
- Tipo 4:* El filamento nace y culmina en otro/otros filamentos, por lo que no es necesario especificar condiciones de borde.

En la Figura 1 se muestra una red constituida por 4 filamentos, uno de cada tipo.

La geometría del canal se provee a través de secciones transversales (distancia margen izquierda versus cota de fondo) arbitrariamente localizadas (ver Figura 1). No obstante, el paso de cálculo espacial Δx es constante, generándose los valores locales de los parámetros geométricos en base a una interpolación lineal entre los correspondientes a las dos secciones de información más cercanas. Este paso espacial se elige de modo tal de poder representar adecuadamente las escalas de movimiento de interés.

Una vez fijado el paso espacial Δx , el paso temporal Δt se elige de forma tal que la velocidad numérica $\Delta x/\Delta t$ sea del orden de la velocidad de propagación de la onda dominante (\sqrt{gh} si hay mareas ó Q/Ω si es una onda de inundación).

Los datos a ingresar al programa son los siguientes (Figura 1):

- a) Topología de la red de flujo.
- b) Secciones transversales de información.
- c) Resistencia hidráulica ("fricción"), zonificada transversalmente.
- d) Condiciones de contorno en los bordes abiertos.
- e) Aportes laterales.
- f) Condiciones iniciales (eventualmente, éstas pueden ser generadas automáticamente).
- g) Parámetros numéricos (pasos espacial y temporal, instantes de impresión, etc.).

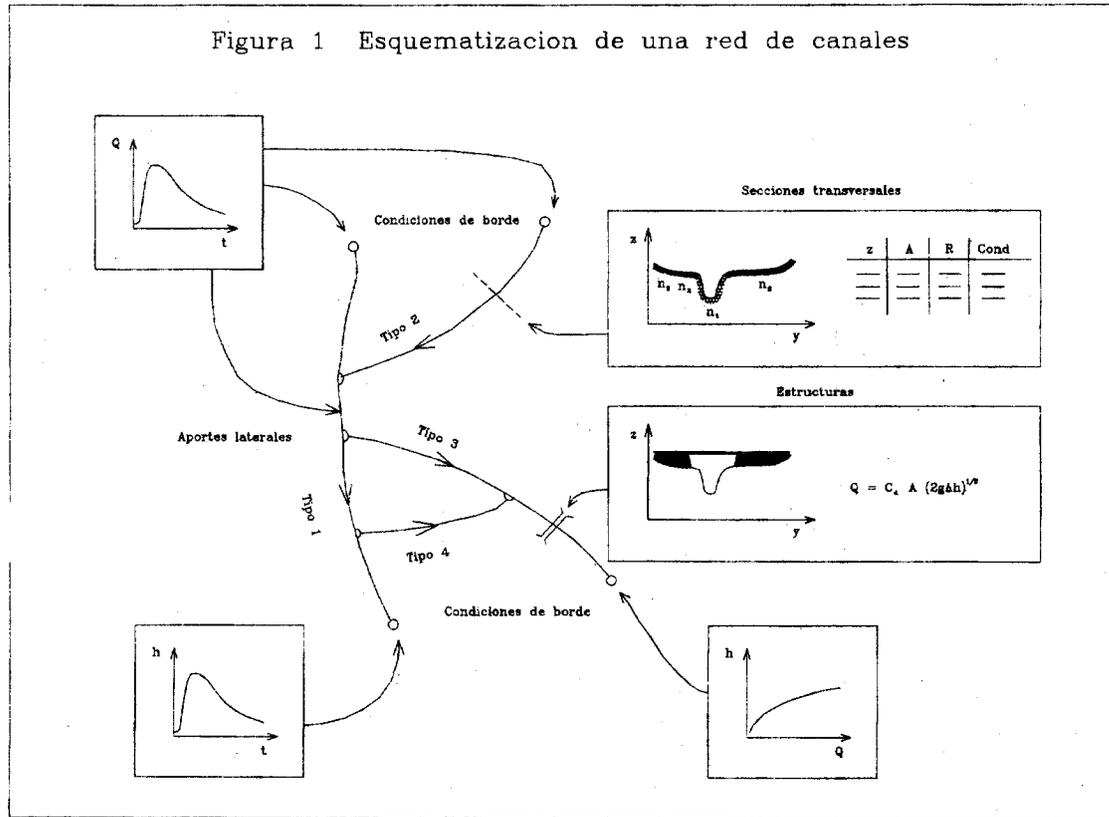
Los resultados básicos provistos por el programa son:

- i) Distribución longitudinal de caudal y nivel para instantes especificados.
- ii) Series temporales de caudal y nivel en secciones especificadas.
- iii) Envolvente de caudal y nivel pico.

APLICACIONES

El programa ha demostrado su versatilidad y eficiencia para una variedad de estudios. A título de ilustración, se describe su aplicación al río Reconquista (Provincia de Buenos Aires), donde se llevaron a cabo estudios de sistematización de la cuenca para diseñar acciones de protección frente a las

Figura 1 Esquematzion de una red de canales



inundaciones.

El modelo matemático hidrodinámico del río Reconquista se extendió desde la Presa Roggero hasta la desembocadura en el río Luján, a través de sus tres brazos: río Tigre, río Reconquista Chico y Canal Aliviador (Figura 2). Se definieron tres filamentos, a saber:

- i) Río Reconquista/Río Tigre (tipo 1): 45 km
- ii) Canal Aliviador (tipo 3): 7 km
- iii) Río Reconquista Chico (tipo 3): 4 km

Para cuantificar la resistencia hidráulica, representada por el coeficiente de fricción de Manning, se procedió a una zonificación de la superficie del terreno sobre la cual se produce el escurrimiento. Se distinguió el cauce principal del valle de inundación. A su vez, el cauce se zonificó en base a un criterio de densidad poblacional. Se definieron cuatro zonas de rugosidad creciente: una rural y las otras tres urbanas con densidad poblacional baja, media y alta, respectivamente.

Para la representación de los afluentes se respetó la esquematización adoptada en la modelización hidrológica de las sub-cuencas que llevan agua al río Reconquista. Los aportes se materializaron como descargas puntuales de masa y cantidad de movimiento coincidentes con los puntos de desembocadura de los arroyos, cuando éstos constituían el eje de la sub-cuenca.

Los puentes viales y ferroviarios que, durante la época de inundación, se convierten en obstáculos al escurrimiento, fueron representados como singularidades, a través de las cuales se verifica una ley hidráulica de pérdida de energía, parametrizada por medio de un coeficiente de descarga C_d . Los que se encontraban muy próximos entre sí fueron agrupados en una sola estructura.

Se tomó un paso de discretización espacial de 1 km, resultando un total de 80 nodos de cálculo. El paso temporal fue de 15 minutos.

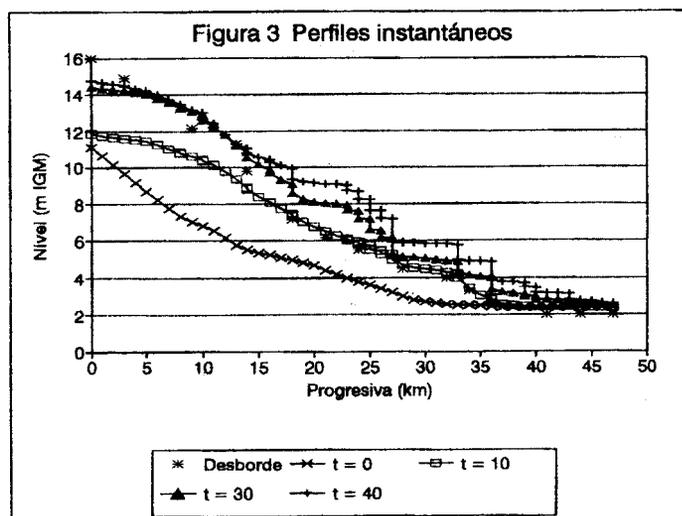
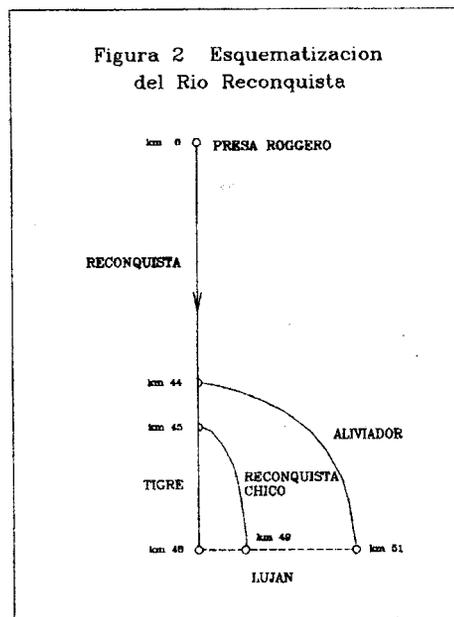
Como evento de calibración se adoptó la crecida del año 1985 (30 de mayo y 1 de junio), para lo cual se dispuso de todos los datos necesarios para alimentar el modelo. Se ajustaron los coeficientes de rugosidad del cauce y las zonas rurales y los coeficientes de descarga en los puentes hasta obtener un acuerdo satisfactorio entre la envolvente de niveles registrada y la calculada con el modelo.

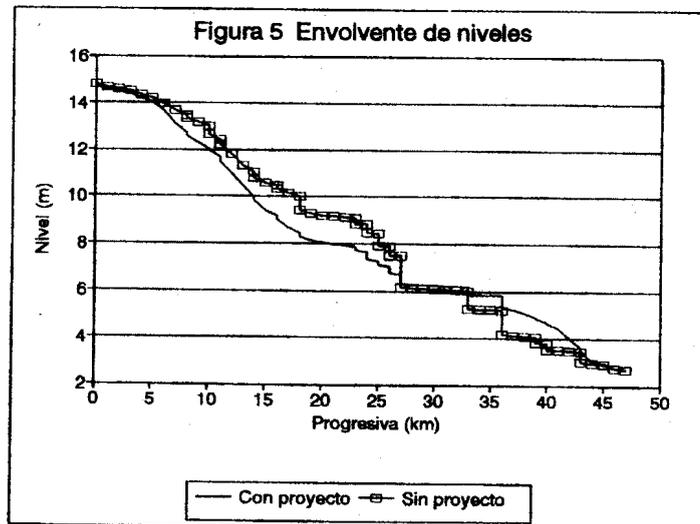
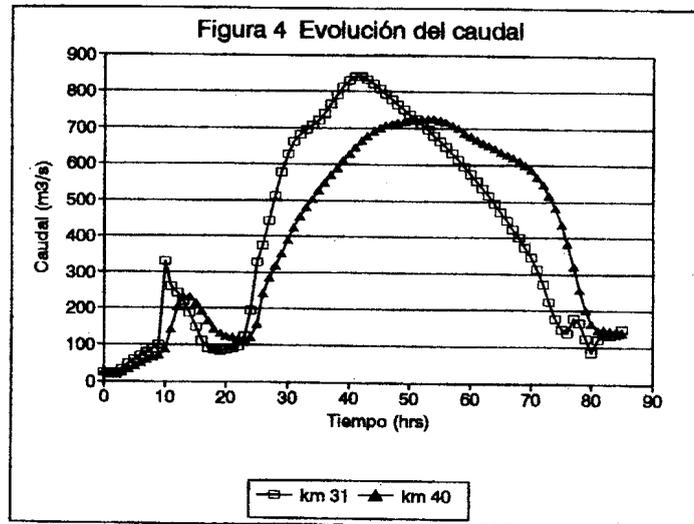
El modelo fue utilizado para simular las condiciones hidrodinámicas durante el pasaje de ondas de inundación correspondientes a 10, 25 y 50 años de recurrencia, distintos niveles del río Luján y diversas alternativas de obras.

A continuación se presentan algunos resultados para el caso de la crecida de 50 años de recurrencia, con un nivel de agua en el río Luján con una recurrencia de 2 años. En la Figura 3 se muestran los perfiles instantáneos del nivel de agua a lo largo del tramo río Reconquista/río Tigre durante la etapa de creciente. Se observa que el desborde se produce desde aguas abajo hacia aguas arriba. Los saltos bruscos de nivel, que se agudizan con el paso del tiempo, corresponden a la ubicación de los puentes. Se nota el fuerte efecto regulador impuesto por los puentes debido al agudo estrechamiento local de la sección de flujo, creando zonas embalsadas aguas arriba de ellos.

En la Figura 4 se presenta la serie temporal de caudales en dos secciones relativamente cercanas del río Reconquista. La disminución del pico de caudal es un efecto netamente dinámico.

Finalmente, en la Figura 5 se comparan las situaciones con y sin proyecto para la envolvente de niveles. Se observa que esa envolvente resulta, para la situación de proyecto, algo superior a la del caso sin proyecto sobre el tramo inferior, debido al angostamiento efectivo de la sección de flujo (durante la





inundación) que provocan los terraplenes que se extenderían entre el km 35 y el 44, a pesar de que se contempla la ampliación de las luces de algunos puentes. En cambio, en el tramo superior, donde no están previstos terraplenes, la canalización produce una disminución de los niveles máximos, como era de esperarse.

CONCLUSIONES

Los modelos numéricos para redes de canales constituyen en la actualidad herramientas asentadas y confiables para el diseño ingenieril. En particular, la técnica numérica utilizada en el programa *EZEIZA V* se ha manifestado robusta, ya que permite simular sin dificultad efectos dinámicos de un extremo al otro del espectro de ondas en aguas poco profundas: desde ondas de gravedad (mareas) a ondas cinemáticas (grandes ondas de inundación).

REFERENCIAS

- [1] Pujol, A., Dolinkue, A.M., *Modelo hidrodinámico EZEIZA III para la simulación de traslación de crecidas en ríos*, Informe LHA-INCYTH 14-001-74, setiembre de 1974.
- [2] Menéndez, A.N., *EZEIZA IV: Un sistema computacional para el cálculo de la traslación de ondas en ríos y canales*, Informe LHA-INCYTH 67-001-87, setiembre de 1987.
- [3] Henderson, F.M., *Open Channel Flow*, MacMillian, New York, 1966
- [4] Pujol, A., Menéndez, A.N., *Análisis unidimensional de escurrimiento en canales*, EUDEBA, 1987.
- [5] Menéndez, A. N., Norscini, R., *Spectrum of Shallow Water Waves: An Analysis*, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 108, No. HY1, January, 1982.
- [6] Menéndez, A. N., Norscini, R., *Wave Attenuation in Open Channel Flow*. Encyclopedia of Fluid Mechanics, N. P. Chermisinoff, editor, Gulf Publishing Co., Vol. 2, 1986.
- [7] Cunge, J.A., Holly, F.M.(Jr.), Verwey, A., *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*, Pitman, 1980.
- [8] Carreras, P., Menéndez, A. N., *Simulación Numérica de Ondas Abruptas en Ríos de Gran Pendiente*, XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San Pablo, Brasil, setiembre de 1986.
- [9] Menéndez, A.N., *Modelo matemático de inundaciones del Río Reconquista*, Primer Informe de Avance, Informe Externo LHA-INCYTH 098-001-89, Comitente: INCONAS, agosto de 1989
- [10] Menéndez, A.N., *Modelo matemático de inundaciones del Río Reconquista*, Segundo Informe de Avance, Informe Externo LHA-INCYTH 098-002-89, Comitente: INCONAS, diciembre de 1989.

