

# CUADERNOS DE INVESTIGACION

NUMERO

# 41

mayo, 1997

## MODELO MATEMATICO DE AREAS DE INUNDACION

Óscar Arturo Fuentes Mariles  
Luis Eduardo Franco Hernández

CENAPRED  
QA402.5  
83  
EJ.6 (1276)  
BIB. No. 8

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES  
MEXICO

1a. edición, mayo 1997

◦ SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN

Abraham González No. 48,  
Col. Juárez, Deleg. Cuauhtémoc,  
C.P. 06699, México, D.F.

◦ CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE  
DESASTRES

Av. Delfín Madrigal N° 665,  
Col. Pedregal de Santo Domingo,  
Deleg. Coyoacán, C.P. 04360, México, D.F.  
Teléfonos: 6 06 98 37, 6 06 97 39, 6 06 91 56.  
Fax: 6 06 16 08

◦ Autores: Óscar Arturo Fuentes Mariles y  
Luis Eduardo Franco Hernández

Derechos reservados conforme a la ley  
IMPRESO EN MEXICO. *PRINTED IN MEXICO*

Distribución Nacional e Internacional: Centro Nacional de  
Prevención de Desastres

EL CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO ES  
EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DE LOS AUTORES

SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN

Lic. Emilio Chuayffet Chemor  
Secretario de Gobernación

Lic. Ricardo García Villalobos Gálvez  
Subsecretario de Protección Civil y de Prevención  
y Readaptación Social

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE  
DESASTRES

Dr. Roberto Meli  
Director General

Dr. Servando de la Cruz Reyna  
Coordinador de Investigación

M. en I. Roberto Quaas  
Coordinador de Instrumentación

Lic. Ricardo Cícero Betancourt  
Coordinador de Difusión

**SISTEMA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL  
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES**



# MÓDELO MATEMÁTICO DE ÁREAS DE INUNDACIÓN

ÓSCAR ARTURO FUENTES MARILES  
LUIS EDUARDO FRANCO HERNÁNDEZ

**COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN  
ÁREA DE RIESGOS HIDROMETEOROLÓGICOS  
MAYO 1997**

~~CENAPRED~~  
CLASIF.: QA402.5/F83 ej.6  
ADQUIS.: CC1276  
FECHA: 17-07-2003  
PROCED.: Donación

# CUADERNOS DE INVESTIGACION

## P R E S E N T A C I O N

---

La Coordinación de Investigación del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) realiza estudios sobre las características de los fenómenos naturales y de las actividades humanas que son fuentes potenciales de desastres, así como sobre las técnicas y medidas que conducen a la reducción de las consecuencias de dichos fenómenos.

Las actividades enfocan la problemática de los Riesgos Geológicos (Sismos y Volcanes), de los Riesgos Hidrometeorológicos (Inundaciones, Huracanes, Sequías, Erosión) y de los Riesgos Químicos (Incendios, Explosiones, Contaminación por Desechos Industriales).

Los resultados de los estudios se publican en Informes Técnicos que se distribuyen a las instituciones y los especialistas relacionados con cada tema específico.

En adición a dichos Informes Técnicos de carácter muy especializado, el CENAPRED ha emprendido la publicación de esta serie, llamada CUADERNOS DE INVESTIGACION, con el fin de dar a conocer a un público más amplio aquellos estudios que se consideran de interés más general o que contienen información que conviene quede publicada en una edición más formal que la de los Informes Técnicos.

Los catálogos de Informes Técnicos y de Cuadernos de Investigación, así como las publicaciones específicas pueden obtenerse solicitándolos por escrito a la Coordinación de Investigación del CENAPRED, o pueden consultarse directamente en su Unidad de Información.

# **MODELO MATEMÁTICO DE ÁREAS DE INUNDACIÓN**

## **RESUMEN**

Se presenta un método matemático para calcular el área de una llanura que se inunda cuando ocurre el desbordamiento de un río o la ruptura de una cortina de un almacenamiento. Se obtiene la profundidad que alcanza el agua y las velocidades del flujo durante el desarrollo de la inundación.

Se incluye un ejemplo que muestra como puede ser aplicado el modelo y sus resultados.

## **ABSTRACT**

The depth and extension of a flood, as well as its flow speed during the event, caused by the overflow of a river or by the failure of a reservoir is calculated here by means of a numerical method. An application of the method is discussed in terms of an actual example.

# CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>ii</b>
<b>CONTENIDO.....</b>	<b>iii</b>
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2 ECUACIONES FUNDAMENTALES .....</b>	<b>3</b>
2.1 ECUACIONES DE CONSERVACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO.....	3
2.2 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.....	6
<b>CAPÍTULO 3 MÉTODO NUMÉRICO.....</b>	<b>7</b>
3.1 ECUACIONES DE CONSERVACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO.....	7
3.2 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.....	11
3.3 CONDICIONES PARA RESOLVER LAS ECUACIONES FUNDAMENTALES ..	11
3.3.1 Condiciones iniciales.....	11
3.3.2 Condiciones para las fronteras izquierda y derecha .....	11
3.3.3 Condiciones para las fronteras superior e inferior .....	12
3.3.4 Hidrograma de entrada .....	13
3.3.5 Consideraciones al cálculo después de que ha cesado el gasto de inundación .....	16
<b>CAPÍTULO 4 APLICACIÓN DEL MÉTODO NUMÉRICO.....</b>	<b>17</b>
4.1 EJEMPLO .....	17
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES .....</b>	<b>22</b>
<b>APÉNDICE A NOTACIÓN .....</b>	<b>24</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....</b>	<b>25</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

Las inundaciones de las regiones cercanas a ríos originan uno de los desastres naturales con mayores pérdidas humanas y materiales. El desbordamiento de las aguas que conduce el cauce del río se debe a la imposibilidad de que fluyan grandes escurrimientos por él.

Las inundaciones que suelen abarcar amplias extensiones de terreno provocan graves trastornos a las comunidades, entre los que se citan las afectaciones a las personas (lesiones, enfermedades e incluso pérdidas de vida) y a los bienes materiales (pérdida de cultivos y animales, así como daños a casas habitación, vías de comunicación, instalaciones eléctricas, caminos, soportes de puente, etc.).

Lo anterior resalta la importancia de predecir los alcances y las consecuencias de las inundaciones, tanto en el área que puede abarcar, como los niveles de agua que pudiera alcanzar. En función de ello, sería posible establecer medidas más efectivas para reducir sus consecuencias desfavorables.

En el estudio de las inundaciones se considera el comportamiento de las corrientes en las épocas de crecientes, su periodicidad y magnitud. Se toman en cuenta factores locales tales como: la capacidad de conducción de escurrimiento del cauce, la existencia y estado de las obras de protección (bordos, cauces de desvío y zonas inundables), puentes (que en algunos casos limitan el flujo de la creciente por el cauce), la configuración del terreno (topografía, tipo de suelo y cubierta vegetal), y muy particularmente la ubicación de las poblaciones (cercanía al cauce y elevación topográfica).

Se define como capacidad de conducción del cauce de un río al gasto más grande que puede transportar sin que los tirantes de agua excedan la elevación de los bordos. Cuando en la cuenca de drenaje del río ocurre una tormenta o lluvia intensa se produce un flujo sobre la superficie del suelo que al llegar a los ríos hace que su gasto aumente hasta un máximo (comúnmente llamado gasto de pico) y luego disminuye, en forma gradual. En el lapso en que el gasto excede a la capacidad de conducción del río, el agua de la corriente sale del cauce y genera una inundación. La extensión de la zona de inundación depende del volumen de agua que escapa del cauce y de los factores locales citados.

El carácter no previsible en el tiempo de las lluvias y del clima, crea la necesidad de realizar mediciones de caudales y de niveles del agua. Éstas permiten llevar a cabo estudios estadísticos de varios aspectos hidrológicos.

Por otra parte, los ríos tienen un comportamiento dinámico, ya que varía la trayectoria de su cauce al paso de los años; ello es debido al arrastre y depósito de las partículas de su lecho que

transporta el agua. Además, en el caso de crecientes rápidas, se puede ampliar su cauce hasta zonas donde el agua no alcanza todos los años e incluso puede formar otro cauce.

En los estudios sobre inundaciones es fundamental determinar el flujo tanto en el cauce del río como fuera de éste, durante el lapso que el gasto excede a la capacidad de conducción.

En este trabajo se pretende determinar el flujo en una región cuando se rebasa la capacidad de conducción de un cauce (por desbordamiento) o existe falla de los bordos que lo contienen. Se plantea un modelo matemático para simular el flujo en llanuras aledañas al cauce para obtener el área inundada, así como la magnitud de los niveles y de las velocidades del agua alcanzados durante la creciente. Lo anterior, permite definir las zonas de riesgo (donde el agua provoca daños debido a la velocidad de la corriente o por el tirante alcanzado por el agua).

En los estudios apoyados en un modelo matemático de simulación del flujo en las regiones de inundación se incorporan las condiciones locales de las zonas cercanas al cauce susceptibles a inundaciones y estructuras tales como puentes y obras de protección.

El empleo de modelos de este tipo sirve para evaluar los daños que provoca una inundación, definir zonas de riesgo, e incluso estimar el funcionamiento de obras de protección tanto existentes como de proyecto. Por otra parte, también hace posible definir estrategias de protección civil después de haber comprobado su efectividad con el modelo de cálculo, para así aprovechar de modo más racional los recursos económicos disponibles.

Este documento se compone de cinco capítulos. En los dos primeros se presentan los conceptos básicos relativos al flujo del agua en una llanura para flujo bidimensional no permanente. En los siguientes capítulos, se desarrolla el modelo matemático propuesto y se muestra su aplicación práctica. En el último capítulo, se exponen las conclusiones y observaciones sobre el trabajo realizado.

## CAPÍTULO 2

### ECUACIONES FUNDAMENTALES

Para analizar las consecuencias de las inundaciones es importante disponer de procedimientos de cálculo para estimar el área cubierta por el agua y las magnitudes de la velocidad del flujo y del tirante. Éstos consisten usualmente en simplificaciones a las ecuaciones básicas que describen el flujo del agua a superficie libre. Sin embargo, el carácter dinámico de las inundaciones y la influencia del desplazamiento del agua hacia las zonas bajas, hacen necesario emplear modelos matemáticos que, por lo menos, incluyan ecuaciones de flujo en dos dimensiones horizontales. En este trabajo, se propone un modelo numérico bidimensional con base en dos ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento y en la ecuación de continuidad; en ellas las velocidades corresponden a su valor promedio en la vertical. Se considera el flujo sobre una región con o sin agua.

Por las características hidráulicas de este fenómeno se requiere tomar en cuenta a la influencia de la pendiente del terreno en dos direcciones horizontales. Además, se considera a las velocidades de desplazamiento del agua en cada dirección y la profundidad del agua en las zonas donde ocurre la inundación.

#### 2.1 ECUACIONES DE CONSERVACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO.

Para estudiar el flujo de agua sobre una planicie se utilizan dos ecuaciones dinámicas en dos dimensiones horizontales. En efecto, en un sistema de ejes cartesiano horizontal las ecuaciones de Navier-Stokes (Mahmood y Yevjevitch, 1975) se pueden escribir como (la notación se incluye en el Apéndice A)

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + X - F_{sx} = \frac{du}{dt}$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + Y - F_{sy} = \frac{dv}{dt}$$

Como la fuerza debida a la resistencia al movimiento ( $F_{sx}$  y  $F_{sy}$ ) se puede expresar en términos de la pendiente de fricción ( $S_{fx}$  y  $S_{fy}$ ), se tiene que

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + X - gS_{fx} = \frac{du}{dt} \quad (2.1)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + Y - gS_{fy} = \frac{dv}{dt} \quad (2.2)$$

Por otra parte, como la velocidad cambia en el espacio y en el tiempo, la diferencial total de su componente en la dirección del eje  $x$  está dado como

$$d u = \frac{\partial u}{\partial t} d t + \frac{\partial u}{\partial x} d x + \frac{\partial u}{\partial y} d y$$

Si se divide la ecuación anterior por  $d t$  y se toma en cuenta que las derivadas ordinarias de  $x$  y  $y$  con respecto al tiempo  $t$  corresponden a las velocidades  $u$  y  $v$ , se obtiene

$$\frac{d u}{d t} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}$$

En forma análoga, para el componente de velocidad  $v$  queda:

$$\frac{d v}{d t} = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}$$

Cuando la ecuación anterior (y su análoga para el componente de la velocidad  $u$ ) se sustituyen en las ecuaciones 2.1 y 2.2 resulta que

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + X - g S_{fx} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.3)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + Y - g S_{fy} = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.4)$$

Dado que las aceleraciones gravitacionales  $X$  y  $Y$  son iguales a las derivadas del potencial gravitacional con respecto a  $x$  y  $y$ . Si ese potencial se define como la aceleración de la gravedad en el sentido del eje  $z$  (perpendicular a  $x$  y  $y$ ), resultan ser

$$X = -\frac{\partial}{\partial x}(gz) \quad ; \quad Y = -\frac{\partial}{\partial y}(gz)$$

o bien

$$X = -g \frac{\partial z}{\partial x} \quad ; \quad Y = -g \frac{\partial z}{\partial y} \quad (2.5)$$

Ya que estas derivadas son iguales a las pendientes del fondo ( $S_x$  y  $S_y$ ) multiplicadas por -1; ambos términos quedan como

$$X = g S_x \quad ; \quad Y = g S_y$$

Al sustituir y ordenar sumandos en las ecuaciones 2.3 y 2.4 se obtiene

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g S_x - g S_{fx} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + g S_y - g S_{fy} = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}$$

Por último, si se considera que la presión es hidrostática ( $p = \rho gh$ ) se llega a

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_x - S_{fx}) \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = g(S_y - S_{fy}) \quad (2.7)$$

Debido a que los cambios de la velocidad en la distancia en una planicie pueden considerarse como despreciables, las derivadas de  $u$  y  $v$  con respecto a  $x$  y  $y$  son eliminadas de las ecuaciones anteriores, y al dividir entre la aceleración de la gravedad se encuentra

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} = (S_x - S_{fx}) \quad (2.8)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial y} = (S_y - S_{fy}) \quad (2.9)$$

Cabe mencionar que cuando se trata con el movimiento del agua en cauces, las derivadas referidas sí deben tomarse en cuenta en el cálculo del flujo.

Para el cálculo de las pendientes de fricción, se propone el uso de la fórmula de Manning-Strickler. De modo que

$$S_{fx} = \frac{n^2 |u| u}{h^{4/3}} \quad (2.10)$$

$$S_{fy} = \frac{n^2 |v| v}{h^{4/3}} \quad (2.11)$$

Si se considera a las ecuaciones 2.5, 2.10 y 2.11 en las ecuaciones 2.8 y 2.9 se tiene

$$\boxed{\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{n^2 |u| u}{h^{4/3}} = -\frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x}} \quad (2.12)$$

$$\boxed{\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{n^2 |v| v}{h^{4/3}} = -\frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial z}{\partial y}} \quad (2.13)$$

Las ecuaciones 2.12 y 2.13 son ecuaciones dinámicas que describen la conservación de cantidad de movimiento considerando que el flujo se lleva a cabo en una llanura.

**2.2 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.**

El principio de conservación de masa en dos dimensiones horizontales establece que (Mahmood y Yevjevich, 1975)

$$\boxed{\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} uh + \frac{\partial}{\partial y} vh = 0} \quad (2.14)$$

A esta expresión también se le llama ecuación de continuidad.

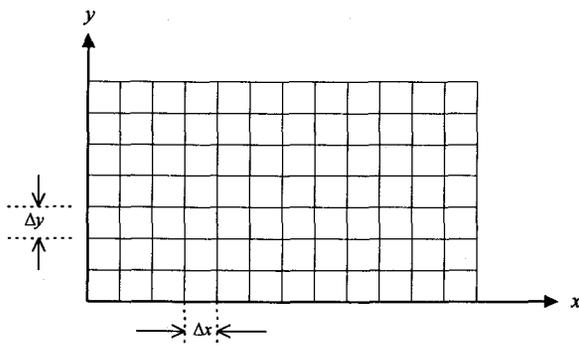
## CAPÍTULO 3

### MÉTODO NUMÉRICO

Para calcular el flujo del agua en una planicie de inundación se debe resolver el sistema de ecuaciones diferenciales formado por las expresiones 2.12, 2.13 y 2.14 considerando ciertas condiciones iniciales y de frontera.

Como no existe un método analítico para encontrar la solución de las ecuaciones mencionadas, para dar con una solución aproximada de las mismas, se propone un método de diferencias finitas.

El área (en proyección horizontal) de la llanura a inundarse, se divide en celdas de forma rectangular de largo  $\Delta x$  y ancho  $\Delta y$ . El conjunto de estas celdas forma una malla (figura 3.1).



**Figura 3.1** Zona de cálculo dentro de la cual se encuentra el área de inundación.

#### 3.1 ECUACIONES DE CONSERVACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO.

Las ecuaciones 2.12 y 2.13 pueden escribirse como

$$|u|u + \alpha \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} = -\alpha \left[ \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} \right] \quad (3.1)$$

$$|v|v + \alpha \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} = -\alpha \left[ \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial z}{\partial y} \right] \quad (3.2)$$

siendo

$$\alpha = \frac{h^{4/3}}{n^2} \quad (3.3)$$

Las velocidades se consideran ubicadas a la mitad de los lados de las celdas. Los tirantes y elevaciones del terreno se localizan en el centro de ellas.

Se propone expresar la ecuación 3.1 en diferencias finitas del modo siguiente

$$|u_{i+1/2,j}^{p+1}|u_{i+1/2,j}^{p+1} + \alpha_{i+1/2,j}^p \frac{u_{i+1/2,j}^{p+1} - u_{i+1/2,j}^p}{g \Delta t} = -\alpha_{i+1/2,j}^p \left[ \frac{h_{i+1,j}^p - h_{i,j}^p}{\Delta x} + \frac{z_{i+1,j} - z_{i,j}}{\Delta x} \right] \quad (3.4)$$

donde

$$x = i\Delta x; \quad y = j\Delta y; \quad t = p\Delta t$$

$$h(x, y, t) = h(i\Delta x, j\Delta y, p\Delta t) = h_{i,j}^p$$

$$u(x + \Delta x/2, y, t) = u((i + 1/2)\Delta x, j\Delta y, p\Delta t) = u_{i+1/2,j}^p$$

$$v(x, y + \Delta y/2, t) = v(i\Delta x, (j + 1/2)\Delta y, p\Delta t) = v_{i,j+1/2}^p$$

$$z(x, y) = z(i\Delta x, j\Delta y) = z_{i,j}$$

En las expresiones anteriores  $i$  y  $j$  son subíndices que se emplean para ubicar en el espacio a las literales de interés (figura 3.2) y  $p$  un superíndice que representa al instante en que se considera a dichas literales.

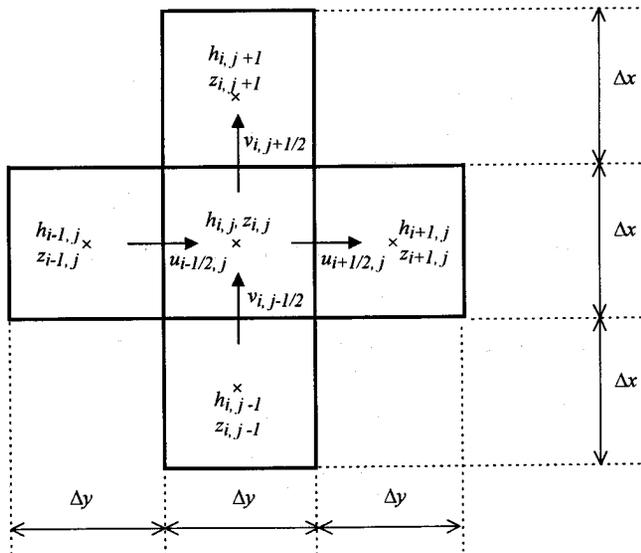


Figura 3.2 Arreglo de celdas considerado en el método numérico.

El parámetro  $\alpha_{i+1/2,j}^p$  se determina así

$$\alpha_{i+1/2,j}^p = \left( \frac{h_{i+1,j}^p + h_{i,j}^p}{2} \right)^{4/3} \frac{1}{n_{i+1/2,j}^2} \quad (3.5)$$

donde

$$n_{i+1/2,j} = \frac{n_{i,j} + n_{i+1,j}}{2}$$

La ecuación 3.4 puede ser escrita como

$$\left| u_{i+1/2,j}^{p+1} \right| u_{i+1/2,j}^{p+1} + B_x u_{i+1/2,j}^{p+1} + C_x = 0 \quad (3.6)$$

siendo

$$B_x = \frac{\alpha_{i+1/2,j}^p}{g \Delta t} \quad (3.7)$$

$$C_x = \frac{\alpha_{i+1/2,j}^p}{\Delta x} (h_{i+1,j}^p - h_{i,j}^p + z_{i+1,j} - z_{i,j}) - \frac{\alpha_{i+1/2,j}^p}{g \Delta t} u_{i+1/2,j}^p \quad (3.8)$$

Como los tirantes son positivos o nulos,  $B_x$  es positiva o igual a cero.  $C_x$  es un número real, por lo que para resolver la ecuación 3.6 se consideran dos casos:

a)  $C_x \leq 0$

La velocidad  $u_{i+1/2,j}^{p+1}$  sería positiva para cumplir con la ecuación 3.6. En estas condiciones

$$\left| u_{i+1/2,j}^{p+1} \right| = u_{i+1/2,j}^{p+1}$$

con lo cual la ecuación 3.6 quedaría como una ecuación de segundo grado cuya solución sería

$$u_{i+1/2,j}^{p+1} = \frac{1}{2} \left( -B_x + \sqrt{B_x^2 - 4C_x} \right) \quad (3.9)$$

El argumento de la raíz cuadrada es mayor a cero (ya que  $C_x$  es negativo o nulo) y el signo de ella debe ser positivo para que la velocidad también lo sea. Así, la velocidad resulta ser positiva.

b)  $C_x > 0$

Para cumplir con la expresión 3.6 la suma de sus dos primeros términos tiene que ser negativa. Así  $\left| u_{i+1/2,j}^{p+1} \right| u_{i+1/2,j}^{p+1}$  cambiaría por  $- \left( u_{i+1/2,j}^{p+1} \right)^2$  de modo que la solución de la ecuación de segundo grado formada se obtendría como

$$u_{i+1/2,j}^{p+1} = -\frac{1}{2} \left( -B_x + \sqrt{B_x^2 + 4C_x} \right)$$

o sea

$$u_{i+1/2,j}^{p+1} = \frac{1}{2} \left( B_x - \sqrt{B_x^2 + 4C_x} \right) \quad (3.10)$$

También en este caso el argumento de la raíz cuadrada sería positivo, y la velocidad en este caso es negativa.

Para el componente de velocidad  $v$  se sigue un razonamiento semejante. En efecto, en lugar de la expresión 3.4 se tiene que

$$\left| v_{i,j+1/2}^{p+1} \right| v_{i,j+1/2}^{p+1} + \beta_{i,j+1/2}^p \frac{v_{i,j+1/2}^{p+1} - v_{i,j+1/2}^p}{g \Delta t} = -\beta_{i,j+1/2}^p \left( \frac{h_{i,j+1}^p - h_{i,j}^p}{\Delta y} + \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j}}{\Delta y} \right) \quad (3.11)$$

donde

$$\beta_{i,j+1/2}^p = \left[ \frac{h_{i,j+1}^p + h_{i,j}^p}{2} \right]^{4/3} \frac{1}{n_{i,j+1/2}^2} \quad (3.12)$$

y

$$n_{i,j+1/2} = \frac{n_{i,j} + n_{i,j+1}}{2}$$

Reescribiendo la ecuación 3.11

$$\left| v_{i,j+1/2}^{p+1} \right| v_{i,j+1/2}^{p+1} + B_y v_{i,j+1/2}^{p+1} + C_y = 0 \quad (3.13)$$

siendo

$$B_y = \frac{\beta_{i,j+1/2}^p}{g \Delta t} \quad (3.14)$$

$$C_y = \frac{\beta_{i+1/2,j}^p}{\Delta y} (h_{i,j+1}^p - h_{i,j}^p + z_{i,j+1} - z_{i,j}) - \frac{\beta_{i,j+1/2}^p}{g \Delta t} v_{i,j+1/2}^p \quad (3.15)$$

En la dirección  $y$  se tendrá para

a)  $C_y \leq 0$

$$v_{i,j+1/2}^{p+1} = \frac{1}{2} \left( -B_y + \sqrt{B_y^2 - 4C_y} \right) \quad (3.16)$$

b)  $C_y > 0$

$$v_{i,j+1/2}^{p+1} = \frac{1}{2} \left( B_y - \sqrt{B_y^2 + 4C_y} \right) \quad (3.17)$$

### 3.2 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.

La ecuación 2.14 en diferencias finitas se considerará del modo siguiente

$$\frac{h_{i,j}^{p+1} - h_{i,j}^p}{\Delta t} + \frac{u_{i+1/2,j}^{p+1} (h_{i+1,j}^p + h_{i,j}^p) - u_{i-1/2,j}^{p+1} (h_{i,j}^p + h_{i-1,j}^p)}{2 \Delta x} + \frac{v_{i,j+1/2}^{p+1} (h_{i,j+1}^p + h_{i,j}^p) - v_{i,j-1/2}^{p+1} (h_{i,j}^p + h_{i,j-1}^p)}{2 \Delta y} = 0$$

Ordenando términos se llega a

$$h_{i,j}^{p+1} = h_{i,j}^p - \frac{\Delta t}{2 \Delta x} \left[ u_{i+1/2,j}^{p+1} (h_{i+1,j}^p + h_{i,j}^p) - u_{i-1/2,j}^{p+1} (h_{i,j}^p + h_{i-1,j}^p) \right] - \frac{\Delta t}{2 \Delta y} \left[ v_{i,j+1/2}^{p+1} (h_{i,j+1}^p + h_{i,j}^p) - v_{i,j-1/2}^{p+1} (h_{i,j}^p + h_{i,j-1}^p) \right] \quad (3.18)$$

Con las ecuaciones 3.9 ó 3.10, 3.16 ó 3.17 y 3.18 se obtienen los valores de  $u$ ,  $v$  y  $h$  en el tiempo  $(p+1)\Delta t$  para las celdas ubicadas en el interior de la zona donde ocurre la inundación.

### 3.3 CONDICIONES PARA RESOLVER LAS ECUACIONES FUNDAMENTALES.

Para la solución de las ecuaciones diferenciales de movimiento se consideran las condiciones iniciales y de frontera que se describen a continuación.

#### 3.3.1 Condiciones iniciales.

Para comenzar los cálculos en el modelo matemático en el tiempo inicial  $t_0$  es necesario asignar los valores a las variables  $u$ ,  $v$  y  $h$ . En este caso, como la zona aledaña al río está sin agua, a estas variables en el tiempo  $t_0$  se les asigna cero.

Cuando existe un cuerpo de agua en la región de interés, las profundidades ( $h$ ) en algunas celdas serían diferentes del valor nulo y corresponderían a tirantes conocidos de dicho cuerpo de agua.

#### 3.3.2 Condiciones para las fronteras izquierda y derecha.

Se considera que en estas fronteras la velocidad es nula. Atendiendo a la distribución de variables de la figura 3.2 y la figura 3.3, cuando  $i$  es igual a 1, la velocidad  $u_{i-1/2, j} = u_{1/2, j}$  es igual a cero. Lo mismo puede decirse de la velocidad  $u_{i-1/2, j} = u_{M-1/2, j}$  cuando  $i$  adquiere su valor máximo posible en la zona en estudio ( $i = M$ ).

En efecto, para el cálculo de la profundidad  $h$  en la frontera izquierda ( $i = 1$ ) la ecuación 3.18 queda así

$$h_{1,j}^{p+1} = h_{1,j}^p - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[ u_{3/2,j}^{p+1} (h_{2,j}^p + h_{1,j}^p) \right] - \frac{\Delta t}{2\Delta y} \left[ v_{1,j+1/2}^{p+1} (h_{1,j+1}^p + h_{1,j}^p) - v_{1,j-1/2}^{p+1} (h_{1,j}^p + h_{1,j-1}^p) \right] \quad (3.19)$$

y para la frontera derecha ( $i = M$ ) se plantea de este modo

$$h_{M,j}^{p+1} = h_{M,j}^p - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[ -u_{M-1/2,j}^{p+1} (h_{M,j}^p + h_{M-1,j}^p) \right] - \frac{\Delta t}{2\Delta y} \left[ v_{M,j+1/2}^{p+1} (h_{M,j+1}^p + h_{M,j}^p) - v_{M,j-1/2}^{p+1} (h_{M,j}^p + h_{M,j-1}^p) \right] \quad (3.20)$$

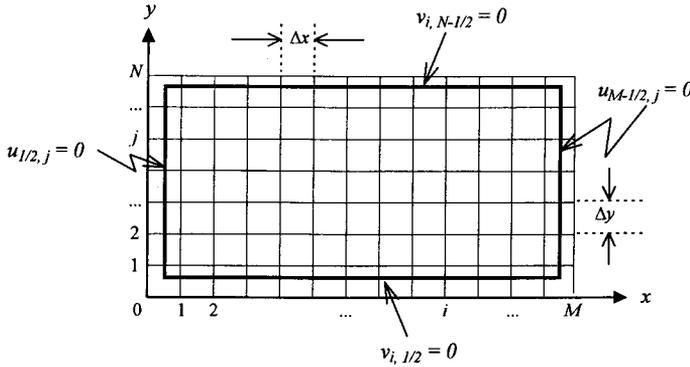


Figura 3.3 Condiciones de frontera consideradas en el esquema de cálculo.

### 3.3.3 Condiciones para las fronteras superior e inferior.

Se considera que en estas fronteras la velocidad es igual a cero. Así en las celdas de la frontera superior ( $j = N$ ) se tiene que  $v_{i,j-1/2} = v_{i,N-1/2} = 0$ . En lo que respecta a la frontera inferior ( $j = 1$ ), las velocidades  $v_{i,j-1/2} = v_{i,1/2}$  también son iguales a cero (figura 3.3).

De la ecuación 3.18, el cálculo de la profundidad  $h$  para la frontera superior se calcula con la expresión siguiente

$$h_{i,N}^{p+1} = h_{i,N}^p - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[ u_{i+1/2,N}^{p+1} (h_{i+1,N}^p + h_{i,N}^p) - u_{i-1/2,N}^{p+1} (h_{i,N}^p + h_{i-1,N}^p) \right] - \frac{\Delta t}{2\Delta y} \left[ -v_{i,N-1/2}^{p+1} (h_{i,N}^p + h_{i,N-1}^p) \right] \quad (3.21)$$

y para la frontera inferior se tiene

$$h_{i,1}^{p+1} = h_{i,1}^p - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[ u_{i+1/2,1}^{p+1} (h_{i+1,1}^p + h_{i,1}^p) - u_{i-1/2,1}^{p+1} (h_{i,1}^p + h_{i-1,1}^p) \right] - \frac{\Delta t}{2\Delta y} \left[ v_{i,3/2}^{p+1} (h_{i,2}^p + h_{i,1}^p) \right] \quad (3.22)$$

**3.3.4 Hidrograma de entrada.**

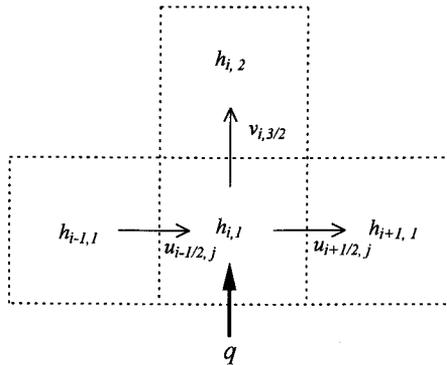
El sitio de entrada del hidrograma puede ser cualquiera de las celdas, de preferencia en las de la frontera. Suponiendo el caso de que sea en la frontera inferior ( $j = 1$ ), se requiere conocer el gasto  $Q$  que ingresa a la malla durante cada intervalo  $\Delta t$ .

El gasto se considera igual a

$$Q = B q$$

donde  $B$  es igual a la longitud por donde entra el gasto y  $q$  es el gasto unitario. La longitud  $B$  es igual a  $\Delta x$  (si ingresa en dirección paralela al eje  $y$ ) o a  $\Delta y$  (si ingresa en dirección paralela al eje  $x$ ).

En las orillas de las celdas donde entra el gasto que produce la inundación se especifica el gasto unitario  $q$ . Por ejemplo, si se lleva a cabo por el lado inferior de la celda  $i, 1$  mostrada en la figura 3.4 se tiene



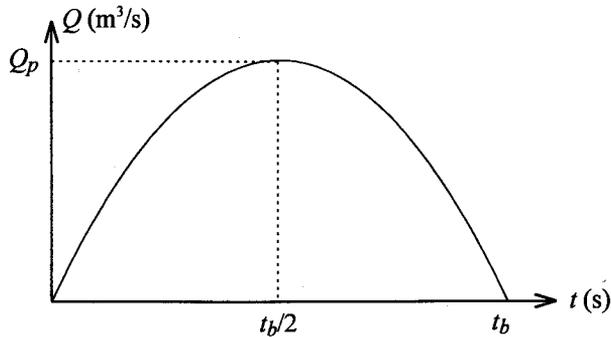
**Figura 3.4 Ingreso del gasto que produce la inundación.**

La ecuación de continuidad 3.18 queda:

$$h_{i,1}^{p+1} = h_{i,1}^p - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[ u_{i+1/2,1}^{p+1} (h_{i+1,1}^p + h_{i,1}^p) - u_{i-1/2,1}^{p+1} (h_{i,1}^p + h_{i-1,1}^p) \right] - \frac{\Delta t}{2\Delta y} \left[ v_{i,3/2}^{p+1} (h_{i,2}^p + h_{i,1}^p) + 2q \right] \tag{3.23}$$

El gasto que entra a la zona de inundación varía en el tiempo, se considera que su hidrograma tiene la forma de una parábola de segundo grado, tal como se muestra en la figura 3.5. Este hidrograma se define a partir del tiempo ( $t_b$ ) en que se mantiene el escurrimiento hacia la zona de inundación y la magnitud del gasto máximo ( $Q_p$ ). La ecuación que permite encontrar el gasto del hidrograma  $Q$  a partir del tiempo  $t$  es la siguiente

$$Q = Q_p - \frac{4Q_p}{t_b^2} \left( t - \frac{t_b}{2} \right)^2 \tag{3.24}$$



**Figura 3.5 Hidrograma de entrada a la zona de inundación.**

El área bajo la curva de la figura 3.5 corresponde al volumen de agua que llega la zona de inundación, en este caso, resulta ser igual a

$$V = \frac{2}{3} Q_p t_b \quad (3.25)$$

El gasto de pico se obtiene de acuerdo con las condiciones más desfavorables que se presentan durante el tiempo que dura el escurrimiento que origina la inundación. Se considera que éste se puede calcular con uno de los dos modos siguientes:

a) Desbordamiento del río.

Sea  $\Delta h$  la diferencia de elevación entre el nivel máximo de la superficie libre del agua en el río y la elevación del bordo que se rebasa (figura 3.6). El gasto de pico se calcula como una descarga por un vertedor de cresta ancha (sobre el bordo del río). Como el gasto unitario para una descarga con tirante crítico ( $y_c$ ) es

$$q = \sqrt{g y_c^3}$$

como el tirante crítico es  $2/3$  de la energía específica en ella, es decir

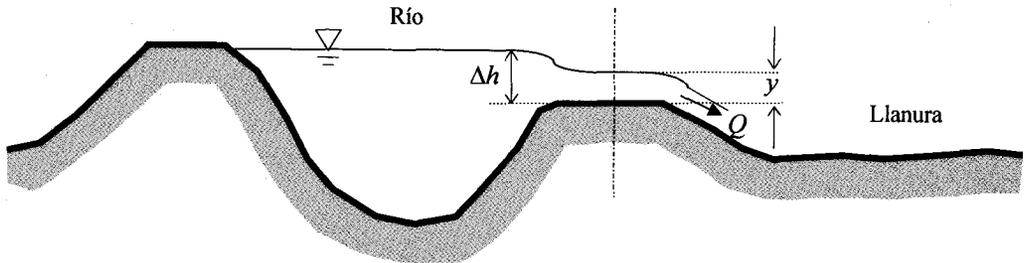
$$y_c = \frac{2\Delta h}{3}$$

resulta que

$$Q_p = Bq = B\sqrt{g\left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \Delta h^{3/2}}$$

tomando en cuenta que  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  se encuentra

$$Q_p = 1.705 B \Delta h^{3/2} \quad (3.26)$$



**Figura 3.6 Corte transversal en el tramo del río que se desborda.**

b) Ruptura de un bordo

Si un bordo de longitud  $B$  que contiene agua con un tirante  $H$  se rompe (figura 3.7). El gasto en la sección (rectangular) de ruptura es

$$Q_p = Au$$

siendo

$$A = By$$

donde  $y$  y  $u$  son el tirante y la velocidad en la sección de ruptura respectivamente. Ellos se calculan en función de  $H$  de esta manera (Fuentes y Osnaya, 1988)

$$y = \frac{4H}{9}$$

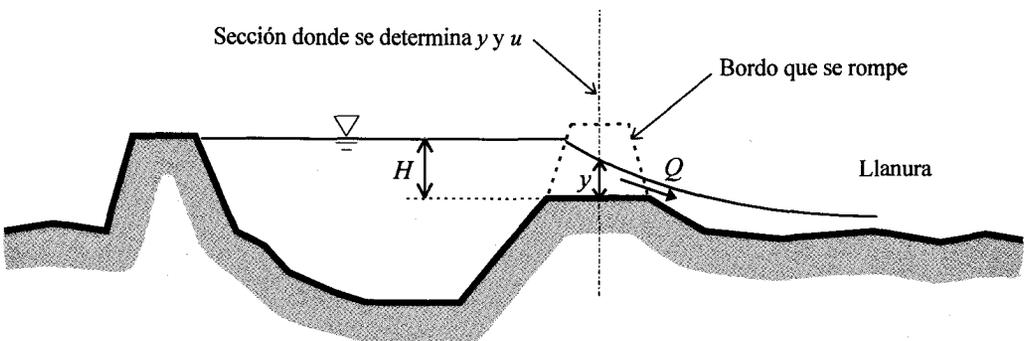
$$u = \frac{2}{3}\sqrt{gH}$$

por lo que el gasto de pico está dado como

$$Q_p = \frac{8}{27} B \sqrt{g} H^{3/2}$$

si se sustituye el valor de la aceleración de la gravedad, la ecuación anterior queda

$$Q_p = 0.9280 BH^{3/2} \tag{3.27}$$



**Figura 3.7 Corte transversal de la ruptura de un bordo.**

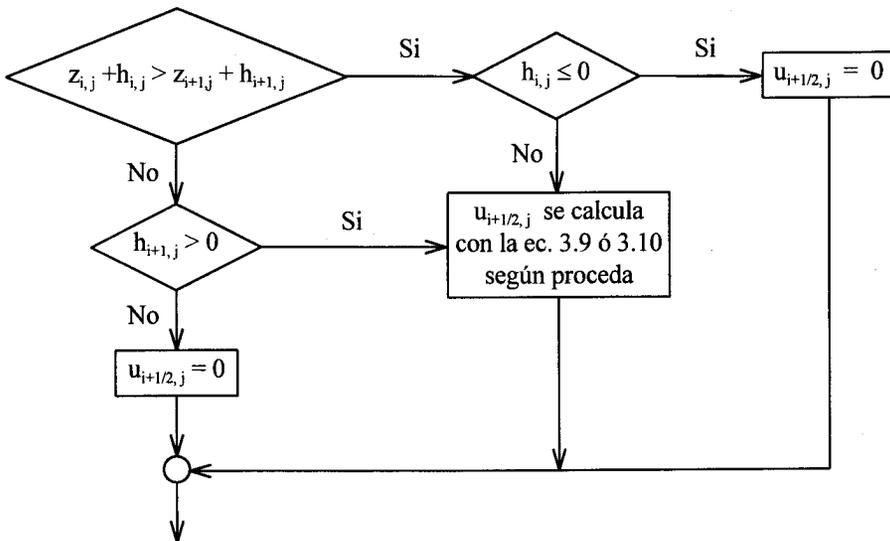
**3.3.5 Consideraciones al cálculo después de que ha cesado el gasto de inundación.**

Una vez que concluyó el flujo que produce la inundación de la llanura (el tiempo es mayor a  $t_b$ ) se requiere incluir en el cálculo de las velocidades de movimiento del agua ciertas condiciones.

Se observa en las ecuaciones 2.12 y 2.13 que si la derivada parcial del tirante es nula y la derivada parcial de la elevación del fondo es distinta de cero, la velocidad debe ser igual a cero. De este modo, el método numérico cumple con la ecuación de continuidad y conforme transcurre el tiempo, se establece un flujo bidimensional en la llanura y, si no tiene aportaciones ni extracciones de gasto, las velocidades tienden a cero.

En el diagrama de la figura 3.8 se muestra la forma en que se lleva a cabo el cálculo de las velocidades en la dirección  $x$  en el método numérico.

Para la velocidad en la dirección  $y$  se sigue un procedimiento similar.



**Figura 3.8 Cálculo de las velocidades del flujo en el método numérico propuesto.**

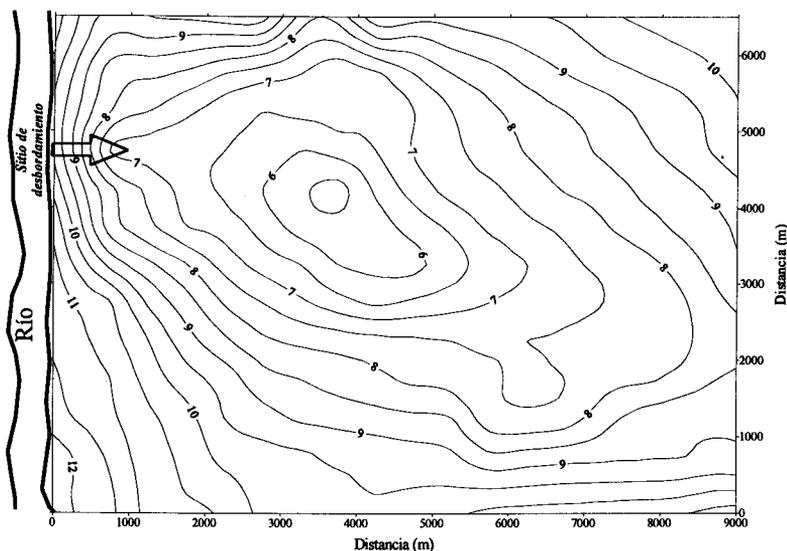
## CAPÍTULO 4

### APLICACIÓN DEL MÉTODO NUMÉRICO

En este capítulo se presenta un ejemplo para mostrar el tipo de resultados que se obtienen con el método numérico en un caso práctico.

#### 4.1 EJEMPLO.

Un río que cruza una llanura se desborda en un tramo de 500 m. Se estima que la elevación del agua alcanza una altura de 1.20 m sobre la margen del río. El tiempo que dura el agua saliendo hacia la llanura es de 12 horas. En la figura 4.1 se muestran las curvas de nivel de una zona de la llanura cercana al sitio donde se desborda el río. Interesa determinar el área que se alcanza a inundar, la elevación del agua en ella y las velocidades del flujo en el momento en que se presenta el gasto máximo.



**Figura 4.1** Curvas de nivel en una parte de la llanura donde se presenta la inundación.

#### SOLUCIÓN

El método expuesto no requiere de otros cálculos cuando la zona de la llanura está recibiendo el gasto que la inunda; sin embargo, cuando cesa dicho gasto, para establecer las condiciones de flujo se deben considerar varios aspectos.

Se escogió  $\Delta x = \Delta y = 500$  m, y  $\Delta t = 20$  s. Del enunciado del ejemplo se deduce que  $B = 500$  m,  $t_b = 12$  h = 43,200 s y como es debida al desbordamiento de un río,  $\Delta h = 1.20$  m. Así, el gasto de pico resulta ser según la ecuación 3.26

$$Q_p = 1.705(500)(1.2)^{3/2} = 1120.641 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

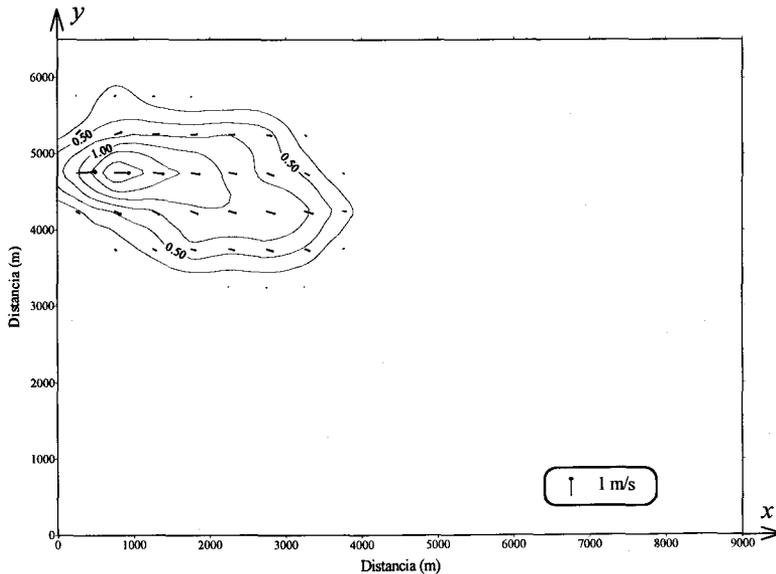
y el volumen de agua que inunda la llanura es (ecuación 3.25):

$$V = \frac{2}{3}(1120.641)(43200) = 32.274 \text{ hm}^3$$

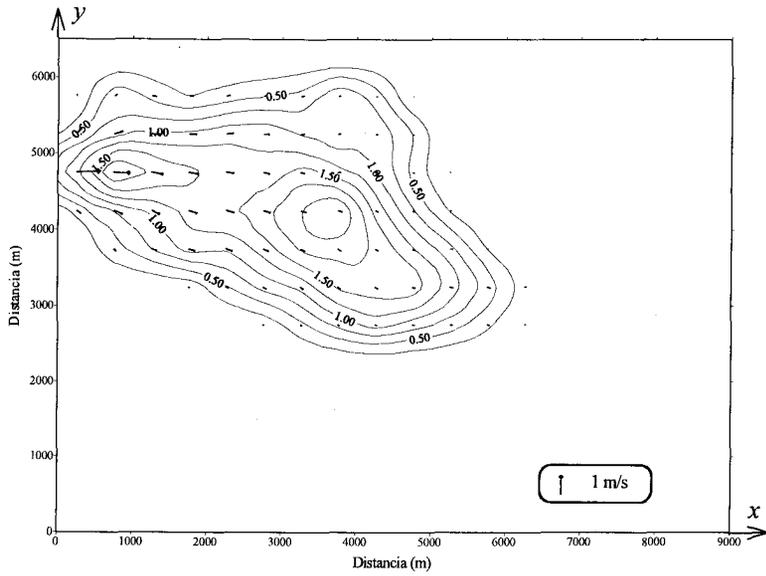
Para los tiempos 3, 6, 9, 12 y 15 h se muestran en las figuras 4.2 a 4.6 las velocidades y los niveles del agua alcanzados por el agua. Es importante resaltar que para tener una mayor comprensión del flujo en la llanura, se promediaron las velocidades correspondientes en las direcciones  $x$  y  $y$  de cada celda, y finalmente se sumaron como vector y se ubicaron en el centro de la misma.

En la figura 4.7 se presentan las áreas y volúmenes de inundación a lo largo del tiempo. Se aprecia que el área cubierta por la inundación está en aumento y llega a un máximo de 30.25 km<sup>2</sup>.

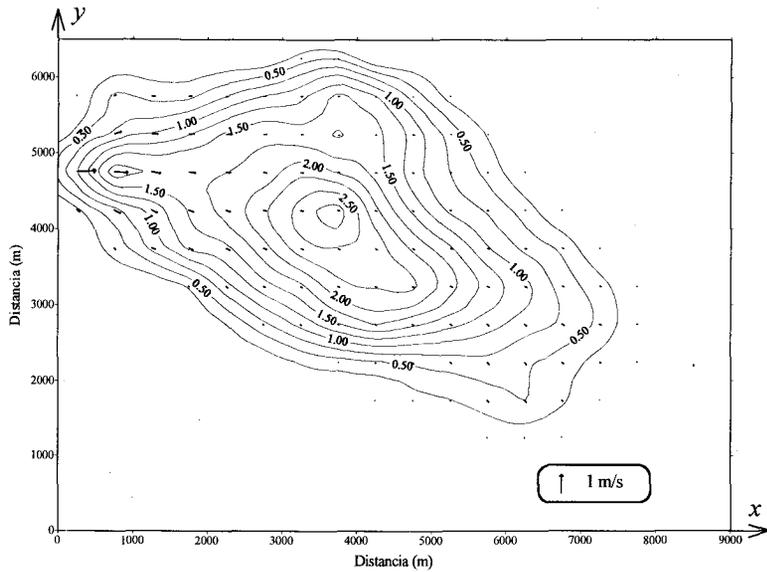
De los resultados se observa que la mayor profundidad hidráulica que se presentó, fue de 3 m y que la profundidad promedio es de  $32.274/30.25 = 1.07$  m. Las velocidades del agua más grandes fueron de 0.9 m/s (en el tiempo correspondiente a 32,400 s).



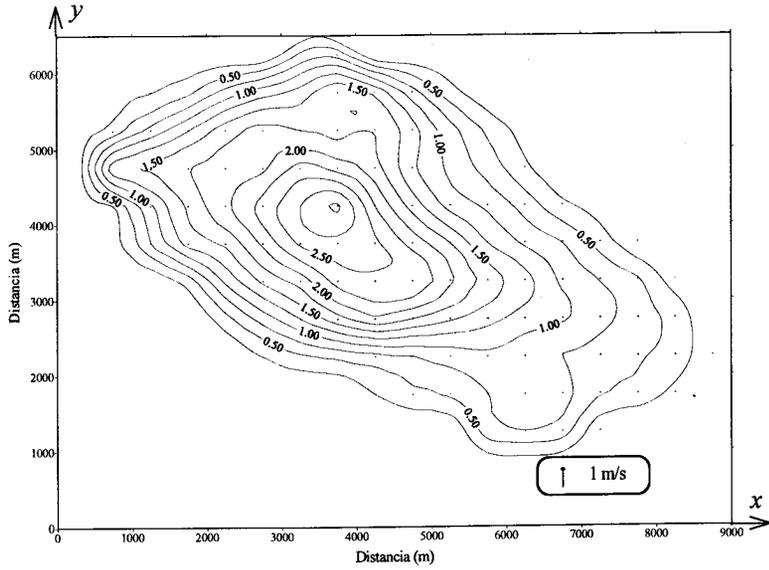
**Figura 4.2 Velocidades y tirantes del flujo alcanzados a las 3 horas del desbordamiento.**



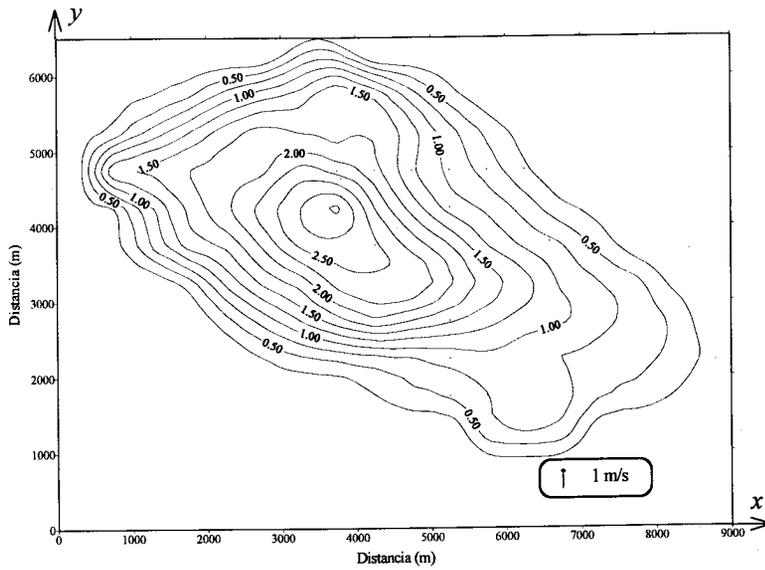
**Figura 4.3** Velocidades y tirantes del flujo alcanzados a las 6 horas del desbordamiento.



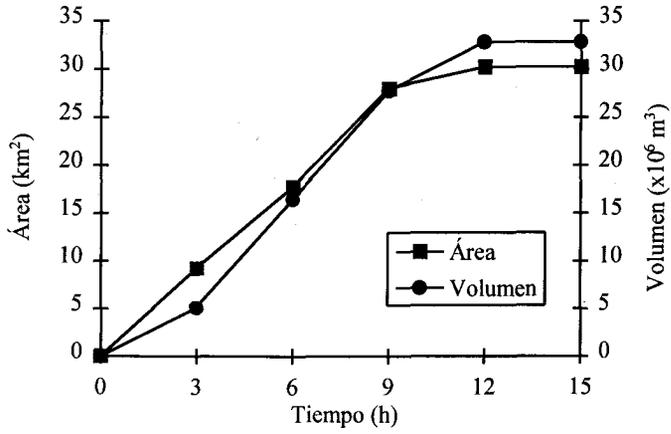
**Figura 4.4** Velocidades y tirantes del flujo alcanzados a las 9 horas del desbordamiento.



**Figura 4.5** Velocidades y tirantes del flujo alcanzados a las 12 horas del desbordamiento.



**Figura 4.6** Velocidades y tirantes del flujo alcanzados a las 15 horas del desbordamiento.



**Figura 4.7** Variación del área y del volumen de inundación a lo largo del tiempo.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSIONES**

El modelo matemático presentado en este trabajo tiene varios propósitos de uso. En general, puede decirse que el modelo es una herramienta útil para la evaluación de procedimientos de control de inundaciones y el análisis del funcionamiento de los sistemas de drenaje.

Básicamente, el modelo determina el comportamiento hidráulico, en el espacio y en el tiempo, del flujo de agua en una planicie. Con él se encuentran las profundidades y las velocidades del flujo en cualquier punto de una zona en estudio en un tiempo dado.

Entre otras aplicaciones del modelo se mencionan los siguientes casos:

a) Cálculo de la evolución del área de inundación:

Se encuentra la extensión de la inundación y las profundidades del agua en ella. Esto permitiría evaluar los daños que se producirían y si se alcanzan a afectar algunos sitios de interés.

b) Avance en el tiempo de la inundación:

El modelo puede emplearse para determinar el crecimiento con el tiempo del área de inundación. Se sabría el tiempo que tardaría en llegar el agua a determinados lugares, a partir de lo cual se podrían establecer medidas de prevención de daños.

c) Revisión de la efectividad de medidas estructurales para mitigar los daños:

Con el modelo puede analizarse el empleo de ciertas zonas para inducir en ellas una inundación para evitarla en regiones donde ocurrirían mayores daños. También podría calcularse como cambiaría la zona inundada con la construcción de bordos y estimar si deja de afectarse cierta superficie del terreno de importancia; o bien si es necesario modificarlos para lograr la protección de dicha superficie.

d) Análisis económicos:

Cuando no existe riesgo de pérdida de vidas humanas, las opciones presentadas para disminuir los daños de la inundación pueden evaluarse en función del costo de las obras de control de inundaciones y el costo del daño evitado.

e) Evaluación de la confiabilidad de los sistemas de drenaje:

Permite determinar la magnitud de los daños por inundación debidos a la falla de un bordo de un río o la insuficiencia del cauce para conducir caudales grandes de uno o de varios componentes del sistema de drenaje tales como ríos, canales, colectores, plantas de bombeo, etc.

En este trabajo se presentó la inundación por el desbordamiento de uno de los bordos de un río. Los resultados obtenidos a lo largo del tiempo mostraron la evolución del área y del volumen de inundación; asimismo se dispuso de los tirantes y de las magnitudes de la velocidad, así como de su dirección. Con esta información, es posible cuantificar los posibles daños a estructuras, edificaciones y pobladores en general.

## APÉNDICE A NOTACIÓN

$\alpha$	Constante definida según la ecuación 3.3
$\rho$	Densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )
$\Delta h$	Diferencia de elevación entre el nivel máximo de la superficie libre del agua en el río y la elevación del bordo (m)
$\Delta t$	Intervalo de tiempo considerado en el cálculo (s)
$\Delta x, \Delta y$	Dimensiones de una celda rectangular en las direcciones $x$ y $y$ respectivamente(m)
$B$	Longitud de ingreso del gasto $Q$ (m)
$B_x$	Constante definida según la ecuación 3.7
$B_y$	Constante definida según la ecuación 3.14
$C_x$	Constante definida según la ecuación 3.12
$C_y$	Constante definida según la ecuación 3.15
$F_{sx}, F_{sy}$	Fuerzas por unidad de masa debidas a la resistencia al movimiento en las direcciones $x$ y $y$ ( $\text{m/s}^2$ )
$g$	Aceleración de la gravedad ( $\text{m/s}^2$ )
$h$	Nivel de la superficie libre del agua con respecto al nivel del terreno natural (m)
$H$	Tirante en el río en la sección donde se rompe el bordo (m)
$i, j$	Subíndices empleados para ubicar en el espacio a las literales de interés pertenecientes a la celda $i, j$
$M$	Número de celdas definidas en la dirección $x$
$n$	Coefficiente de rugosidad según la fórmula de Manning ( $\text{s/m}^{1/3}$ )
$N$	Número de celdas definidas en la dirección $y$
$p$	Presión ( $\text{kgf/m}^2$ )
$p$	Superíndice que indica el instante de tiempo en que se evalúan las literales de interés
$Q$	Gasto de inundación ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$q$	Gasto unitario de inundación ( $\text{m}^3/\text{s/m}$ )
$Q_p$	Gasto máximo de un hidrograma parabólico ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$S_{fx}, S_{fy}$	Pendientes de fricción en las direcciones $x$ y $y$ (adimensional)
$S_x, S_y$	Pendientes del terreno en las direcciones $x$ y $y$ (adimensional)
$t$	Tiempo (s)
$t_0$	Tiempo inicial de cálculo (s)
$t_b$	Tiempo base de un hidrograma parabólico (s)
$u, v$	Componentes de la velocidad en las direcciones $x$ y $y$ (m/s)
$V$	Volumen ( $\text{m}^3$ )
$X, Y$	Fuerzas de cuerpo por unidad de masa en las direcciones $x$ y $y$ ( $\text{m/s}^2$ )
$x, y, z$	Direcciones del sistema de ejes cartesiano derecho siendo las dos primeras horizontales y la última vertical
$y_c$	Tirante crítico (m)
$z$	Nivel del terreno con respecto a un nivel de referencia (m)

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- 1) Abbott, M. B., Basco, D. R. (1990), "Computational Fluid Dynamics, An introduction for engineers", Longman Scientific & Technical, UK.
- 2) Fuentes M., O., Osnaya R., J. (1988), "Rotura de embalses", Capítulo 25, preparado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM para el Manual de Ríos de la Comisión Nacional del Agua.
- 3) Mahmood, K., Yevjevitch, V. (1975), "Unsteady flow in open channels", Water Resources Publications, USA.
- 4) Smith, G. D. (1978), "Numerical Solution of partial differential equations: Finite difference methods", Oxford University Press; UK.
- 5) Viessman, W., Knapp, J., Lewis, G., Harbaugh, T. (1977), "Introduction to Hydrology", Second edition, Harper & Row publishers, USA.

## TITULOS PUBLICADOS

**Cuaderno de Investigación No. 1:** *Bases de datos para la estimación de riesgo sísmico en la ciudad de México*; Mario Ordaz, Roberto Meli, Carlos Montoya Dulché, Lorenzo Sánchez y L. E. Pérez Rocha.

**Cuaderno de Investigación No. 2:** *Transporte, destino y toxicidad de constituyentes que hacen peligroso a un residuo*; María Esther Arcos Serrano, Josefina Becerril Albarrán, Margarita Espíndola Zepeda, Georgina Fernández Villagómez y María Eugenia Navarrete Rodríguez.

**Cuaderno de Investigación No. 3:** *Procesos fisicoquímicos para estabilización de residuos peligrosos*; Margarita Yolanda Espíndola Zepeda y Georgina Fernández Villagómez.

**Cuaderno de Investigación No. 4:** *Reflexiones sobre las inundaciones en México*; Ramón Domínguez Mora, Martín Jiménez Espinosa, Fermín García Jiménez y Marco Antonio Salas Salinas.

**Cuaderno de Investigación No. 5:** *Modelo lluvia-escurrencimiento*; Ramón Domínguez Mora, Martín Jiménez Espinosa, Fermín García Jiménez y Marco Antonio Salas Salinas.

**Cuaderno de Investigación No. 6:** *Comentarios sobre las normas industriales japonesas de la calidad del concreto; Práctica de Diseño y Construcción en el Japón*; editados por Motoji Saito y Hideaki Kitajima; traducidos por Keiko Suzuki; revisados por Sergio M. Alcocer.

**Cuaderno de Investigación No. 7:** *Comentarios sobre las normas industriales japonesas de la calidad de agregados para concreto*; editados por Motoji Saito y Hideaki Kitajima; traducidos por Keiko Suzuki; revisados por Sergio M. Alcocer.

**Cuaderno de Investigación No. 8:** *Report on the January 17, 1994 Northridge Earthquake Seismological and Engineering Aspects; Estudios de Campo*; Takeshi Mikumo, Carlos Gutiérrez, Kenji Kikuchi, Sergio M. Alcocer y Tomás A. Sánchez.

**Cuaderno de Investigación No. 9:** *Application of FEM (Finite element method) to RC (Reinforced concrete) structures; Investigaciones sobre Sismología e Ingeniería Sísmica en el Japón*; Hiroshi Noguchi.

**Cuaderno de Investigación No. 10:** *Japanese Press Design Guidelines for Reinforced Concrete Buildings; Práctica de Diseño y Construcción en el Japón*; Shunsuke Otani.

**Cuaderno de Investigación No. 11:** *Development of advanced reinforced concrete buildings using high-strength concrete and reinforcement -New Construction Technology in Japan-; Investigaciones sobre Sismología e Ingeniería Sísmica en el Japón*; Shunsuke Otani.

**Cuaderno de Investigación No. 12:** *Red de Observación Sísmica del CENAPRED. Registros acelerográficos obtenidos durante 1993*; Bertha López Najera, Roberto Quaas Weppen, Salvador Medina Morán, Enrique Guevara Ortiz y Ricardo González Fragoso.

**Cuaderno de Investigación No. 13:** *Normas de Diseño para Estructuras de Mampostería del Instituto de Arquitectura del Japón; Práctica de Diseño y Construcción en el Japón*; traducción: Koji Yoshimura, Kenji Kikuchi y Tomás A. Sánchez.

**Cuaderno de Investigación No. 14:** *Informe del estado actual de las edificaciones dañadas durante el sismo de Michoacán de 1985 en la zona epicentral (Revisión de los métodos de reparación y refuerzo empleados) - Informe sobre las Ciudades de Lázaro Cárdenas e Ixtapa/Zihuatanejo-; Estudios de Campo*; Shunsuke Otani, Kenji Kikuchi, Sergio M. Alcocer y Oscar López B.

**Cuaderno de Investigación No. 15:** *A study on nonlinear finite element analysis of confined masonry walls*; Kazuhiko Ishibashi y Hideo Katsumata.

**Cuaderno de Investigación No. 16:** *Deterministic inverse approaches for near-source high-frequency strong motion*; Masahiro Iida.

**Cuaderno de Investigación No. 17:** *Seguridad sísmica de la vivienda económica*; R. Meli, S. M. Alcocer, L. A. Díaz Infante, T. A. Sánchez, L. E. Flores, R. Vázquez del Mercado y R. R. Díaz.

**Cuaderno de Investigación No. 18:** *Sismicidad y movimientos fuertes en México: Una visión actual;* Shri K. Singh y Mario Ordaz.

**Cuaderno de Investigación No. 19:** *Red de Observación Sísmica del CENAPRED. Registros acelerográficos obtenidos durante 1990;* Bertha López Najera, Roberto Quaas Weppen, Salvador Medina Morán, Enrique Guevara Ortiz y Ricardo González Frago.

**Cuaderno de Investigación No. 20:** *Red de Observación Sísmica del CENAPRED. Registros acelerográficos obtenidos durante 1991;* Bertha López Najera, Roberto Quaas Weppen, Salvador Medina Morán, Enrique Guevara Ortiz y Ricardo González Frago.

**Cuaderno de Investigación No. 21:** *Red de Observación Sísmica del CENAPRED. Registros acelerográficos obtenidos durante 1992;* Bertha López Najera, Roberto Quaas Weppen, Salvador Medina Morán, Enrique Guevara Ortiz y Ricardo González Frago.

**Cuaderno de Investigación No. 22:** *Development of new reinforced concrete structures;* Hiroyuki Aoyama.

**Cuaderno de Investigación No. 23:** *Respuesta sísmica de edificios de mampostería desplantados en suelo blando;* Roberto Durán Hernández y Eduardo Miranda Mijares.

**Cuaderno de Investigación No. 24:** *Erosión de laderas;* Fermín García Jiménez, Oscar Fuentes Mariles y Jesús Gracia Sánchez.

**Cuaderno de Investigación No. 25:** *Espectros de diseño sísmico para limitar el daño estructural;* M. Ordaz y E. Faccioli.

**Cuaderno de Investigación No. 26:** *Escurrimientos en ríos y volúmenes de inundación por desbordamiento;* Oscar Arturo Fuentes Mariles, Marco Antonio Salas Salinas, Martín Jiménez Espinosa, María Teresa Vázquez Conde y Fermín García Jiménez.

**Cuaderno de Investigación No. 27:** *Muestreo y caracterización de residuos peligrosos;* María Eugenia Navarrete Rodríguez y Josefina Becerril Albarrán.

**Cuaderno de Investigación No. 28:** *Avenidas de diseño para presas de gran capacidad;* María Teresa Vázquez Conde, Martín Jiménez Espinosa, Ramón Domínguez Mora y Oscar Fuentes Mariles.

**Cuaderno de Investigación No. 29:** *Tecnologías de tratamiento para la descontaminación de suelos;* Carlos Manuel Ibarra Díaz, María Esther Arcos Serrano, Cecilia Izcapa Treviño y Georgina Fernández Villagómez.

**Cuaderno de Investigación No. 30:** *Red de Observación Sísmica del CENAPRED. Registros acelerográficos obtenidos durante 1994;* Bertha López Najera, Roberto Quaas Weppen, Martha Legorreta Díaz, Enrique Guevara Ortiz, Ricardo González Frago, David Almora Mata y Ricardo Vázquez Larquet.

**Cuaderno de Investigación No. 31:** *A statistical method for the investigation of site effects by means of downhole array -SH and Love waves-;* Shigeo Kinoshita.

**Cuaderno de Investigación No. 32:** *Introducción al método de pruebas en línea controladas por computadora -pruebas pseudodinámicas-;* Oscar López Bátiz, Masayoshi Nakashima, Naoki Tanaka, Hiroto Kato y Jun Tagami.

**Cuaderno de Investigación No. 33:** *Microzonificación sísmica de la ciudad de Colima;* Carlos Gutiérrez M., Kazuaki Masaki, Javier Lermo y Julio Cuenca.

**Cuaderno de Investigación No. 34:** *Estudios del subsuelo en el valle de México;* Yamashita Architects & Engineers Inc. Oyo Corporation, Miguel A. Santoyo.

**Cuaderno de Investigación No. 35:** *Un Procedimiento para el Diseño de Obras de Excedencias;* José Luis Sánchez Bribiesca, Fernando González Villarreal, Ramón Domínguez Mora, Martín Jiménez Espinosa.

**Cuaderno de Investigación No. 36:** *Norma para la Evaluación del Nivel de Daño por Sismo en Estructuras y Guía Técnica de Rehabilitación (Estructuras de Madera);* Takeshi Jumonji.



001276

*Cuaderno de Investigación N° 41 "Modelo matemático de áreas de inundación"*

se terminó de imprimir en julio de 1997 en los Talleres Gráficos de México

Av. Canal del Norte No. 80, Col. Felipe Pescador, México, D.F. La edición en papel bond de 44 Kg. en interiores y portada en cartulina couché de 235 grs. consta de 400 ejemplares más sobrantes para reposición y estuvo al cuidado del Lic. Ricardo Cícero Betancourt y Violeta Ramos Radilla.



SECRETARIA DE GOBERNACION  
SUBSECRETARIA DE PROTECCION CIVIL Y DE PREVENCIÓN  
Y READAPTACION SOCIAL  
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES