

MODELACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO HIPERCONCENTRADO EN CAUCES TORRENCIALES

Rodríguez Velázquez Miguel Ángel¹, Domínguez Mota Francisco Javier¹, Domínguez Sánchez Constantino¹, María Reyna Espinosa Espinosa¹

¹Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida Francisco J. Mujica S/N Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.

miguelinrodriguez.v@gmail.com, dmota@umich.mx, constantinods@hotmail.com, espinosamareyna@gmail.com

Introducción

A través de los años, la República Mexicana se ha visto azotada por diversos fenómenos meteorológicos dejando como evidencia que a pesar de los esfuerzos realizados para enfrentar de una manera óptima los efectos de estos fenómenos, es necesario trabajar más en las actividades de prevención de desastres naturales (CNA, 2011).

En épocas recientes, se han producido fenómenos hidrometeorológicos en el estado de Michoacán, que por sus condiciones geográficas y orográficas facilitan para que se desarrollen tormentas tropicales, ocasionando inundaciones, deslaves u otros efectos. Tal fue el caso en febrero de 2010 en Angangueo, estado de Michoacán, donde las lluvias intensas desencadenaron la inestabilidad de las laderas. La masa de suelo removida, mezclada con el agua, escurrieron en forma de flujo hiperconcentrado afectando directamente a la localidad. La microcuenca hidrográfica del río San Pedro fue la zona con mayor repercusión (Figueroa, 2013).

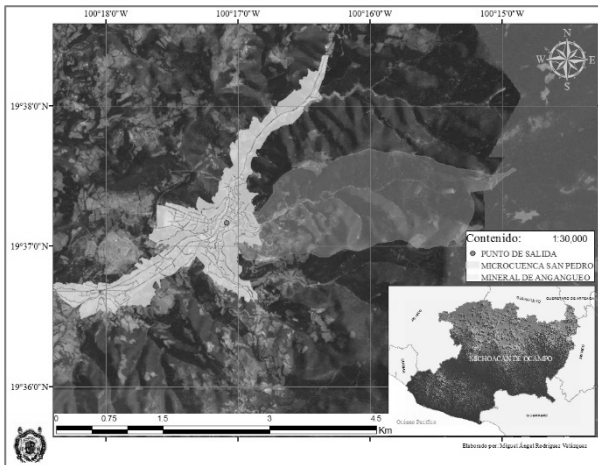


Figura 1. Mapa de localización de la microcuenca del río San Pedro.

De acuerdo a los registros y trabajos de campo desarrollados en el Municipio (Figueroa, 2013), la microcuenca del río San Pedro fue de las de mayor repercusión durante el evento en febrero de 2010.

Aquí se presentan las ecuaciones que gobiernan este tipo de flujos y los resultados de la simulación del San Pedro en condiciones de flujos de agua clara y de flujo hiperconcentrado.

Objetivo

Desarrollar una metodología para la modelización numérica de geo-materiales fluidificados, aplicable a la simulación de la propagación de los flujos hiperconcentrados y de derrubios en cauces torrenciales.

Metodología

La solución numérica de las ecuaciones hidrodinámicas de conservación de masa y cantidad de movimiento, conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes, y la correspondiente a los

modelos reológicos, es conveniente realizarla en forma integral por el método de volúmenes finitos, a fin de reproducir adecuadamente los principios hidráulicos de conservación. En este trabajo se empleó la implementación incluida en IBER (IBER, 2004).

Para el caso de interés, que puede considerarse bidimensional aunque no newtoniano debido a la presencia de los flujos hiperconcentrados, las ecuaciones quedan expresadas como

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{\rho g}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \alpha_i \rho_s \lambda^2 c^2 \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 \text{sen} \alpha_i + f_x \quad [1]$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{\rho g}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \alpha_i \rho_s \lambda^2 c^2 \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 \text{sen} \alpha_i - f_y \quad [2]$$

en donde U , V , W representan las componentes de la velocidad en las direcciones x , y , z , respectivamente. t representa al tiempo, ρ la densidad, la cual se obtiene de una ecuación de estado; g la aceleración de la gravedad α_i es una constante experimental, ρ_s es la densidad de las partículas sólidas, λ representa la concentración lineal de Bagnold, c es el diámetro de la partícula, $\frac{dv}{dz}$ representa la velocidad de deformación y α_i es el ángulo de fricción dinámico que depende de las condiciones de colisión.

En las expresiones anteriores, el modelo reológico aporta una expresión que relaciona las tensiones y velocidades de deformación. Para nuestro caso, dichas relaciones se representan mediante el modelo de Takahashi (Sánchez, 2009), el cual se basa en el concepto de tensiones dispersivas desarrollado por Bagnold en 1954; además, considera que la tensión dispersiva es inducida por la colisión entre las partículas.

Para poder dar solución a una ecuación diferencial mediante este método numérico es necesario realizar una discretización espacial de la zona de estudio, lo cual se logra elaborando una malla de cálculo, es decir, dividiendo el dominio o zona de estudio en celdas de menor tamaño. En este trabajo para dicha discretización se emplean triangulaciones adaptativas de tipo Delaunay.

Empleando la discretización espacial de las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento se realiza la integral de las ecuaciones diferenciales en cada celda de la malla de cálculo empleando el teorema de Gauss. De esta forma, es posible formular de forma eficiente los métodos conservativos; la discretización de las ecuaciones de aguas someras bidimensionales en forma vectorial viene dada por la siguiente expresión:

$$\frac{W_i^{n+1} - W_i^n}{\Delta t} A_i + \oint_{L_i} (F_x \hat{n}_x + F_y \hat{n}_y) dL = \sum_k G_{k,i} A_i \quad [3]$$

en donde el vector de variables conservativas \mathbf{W} y el vector de los términos de flujo \mathbf{F}_y vienen dados por:

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{pmatrix} \quad \mathbf{F}_x = \begin{pmatrix} q_x \\ \frac{q_x^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \\ \frac{q_x q_y}{h} \end{pmatrix} \quad \mathbf{F}_y = \begin{pmatrix} q_y \\ \frac{q_x q_y}{h} \\ \frac{q_y^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \end{pmatrix}$$

y los términos \mathbf{G}_{ki} representan la contribución de los términos fuente.

En la discretización, la integral de contorno correspondiente a los términos de flujo convectivo se calcula a partir de una función numérica Φ , que en un caso unidimensional tiene la forma:

$$\oint_{L_i} (\mathbf{F}_x \hat{n}_x + \mathbf{F}_y \hat{n}_y) dL \approx \sum_{j \in k_i} \Phi_{LR}(\mathbf{W}_L, \mathbf{W}_R, \mathbf{n}_{ij}), \quad [4]$$

en donde Φ_{ij} es una función de flujo numérica, definida para cada arista LR, donde L y R son los nodos izquierda (Left) y derecha (Right) de acuerdo a la arista de la malla considerada (IBER, 2004).

Resultados

Se ha realizado una simulación preliminar con el fin de delimitar la zona en donde se hará una simulación más detallada para el caso de flujo hiperconcentrado y de detritos.

Para la simulación preliminar se construyó un mallado en el software IBER v. 2.4.1 a partir de un archivo de formato .txt, el cual contiene las coordenadas y elevaciones de un modelo digital de elevaciones, con resolución de 1 m. El modelo digital de elevaciones se obtuvo a partir de un levantamiento topográfico, y se transformó a un archivo de código ascii mediante el software ARC-MAP 10.1.

La discretización de la zona fue mediante una malla con 820,054 elementos triangulares de tipo Delaunay. De acuerdo con Figueroa (2013) el gasto pico es de 94.8 m³/s, correspondiente al hidrograma de la microcuenca del río San Pedro para una hp máxima de 104 mm registrada por la estación meteorológica 160333 Chincua-Seguio.

Para la simulación preliminar los datos inflow el tiempo de simulación es de 7500 segundos (125 minutos), similar al tiempo de duración del hidrograma de escurrimiento.

Se presentan a continuación las velocidades alcanzadas durante la simulación:



Figura 2.- Simulación en Iber 2.4.1 en condiciones de agua clara en el paso de tiempo 1400.

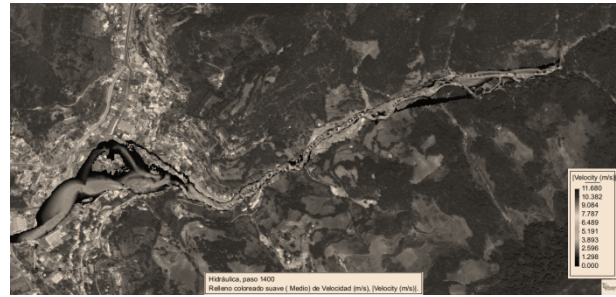


Figura 3.- Simulación en Iber 2.4.1 en condiciones de flujo hiperconcentrado en el paso de tiempo 1400.

Conclusiones

Es conveniente comenzar la formulación para la modelización de manera análoga como se hace para flujos newtonianos. No obstante, la diferencia relevante en las ecuaciones que gobiernan a los flujos newtonianos y no newtonianos radica en el tensor de esfuerzos efectivos, el cual se modificará de acuerdo a las ecuaciones constitutivas.

El comportamiento de la superficie libre del agua y la velocidad del flujo obtenida mediante la resolución de las ecuaciones gobernantes con la metodología de volúmenes finitos reproduce cualitativamente bien el comportamiento del flujo.

Al comparar las características hidráulicas para flujos hiperconcentrados contra los flujos en condiciones de agua clara se nota un aumento significativo en la velocidad de la simulación de flujo para los primeros.

Referencias

- CNA (2011). Manual para el control de inundaciones. SEMARNAT
- Figueroa, M. S. (2013). "Estudio del peligro por flujos de detritos y corrientes hiperconcentradas mediante simulación numérica en FLO-2D, caso de estudio: Anganguero, Mich.". (Tesis de Maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.
- IBER. (2014). "Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Manual de referencia hidráulico. Recuperado de: <http://iberaula.es/modelo-iber/descarga>
- Leveque, R. J. (2007). "Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential Equations". *Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM)*, Philadelphia.
- Leveque, R. J. (1992). "Numerical Methods for Conservation Laws". *Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser*.
- Melendo, A. and Coll, A. and Pasenau, M. and Escolano, E. and Monros, A (2016). www.gidhome.com. Online; accessed Jun-2016., <http://www.gidhome.com>
- Moreles V. M. A. & Botello, R. S. (2008). "Notas de Modelación y Métodos Numéricos II. La ecuación de advección-difusión-reacción en problemas hidrológicos"; *CIMAT & CIMNE*.
- Salas, S. M. A. & Jiménez, E. M. (2004). "Informe técnico de la visita realizada al municipio de Coalcomán de Vázquez Pallares, Mich. Los días 10 a 12 de septiembre de 2003, para identificar su problemática de inundaciones y proponer algunas soluciones". Recuperado de: [CENAPRED.http://www.cenapred.unam.mx/es/Transparencia/FAQ/SI/Anexo8.2/04_21_DIRH_25112004.pdf](http://www.cenapred.unam.mx/es/Transparencia/FAQ/SI/Anexo8.2/04_21_DIRH_25112004.pdf)
- Sánchez, M. M. (2009). "Modelación de flujos de derrubios empleando el método SPH. Aplicación a casos reales". (Tesis de Doctorado). *Universidad Politécnica de Madrid, E. T. S. de ingenieros de caminos, canales y puertos*. Madrid, España.
- Vázquez, C. M. E. (2014). "Introducción al método de volúmenes finitos". *Universidad de Santiago de Compostela*, España.