# ESTIMACIÓN DE ZONAS DE ALTO RIESGO EROSIVO EN RÍOS PEQUEÑOS, UTILIZANDO UN MODELO HIDRÁULICO BIDIMENSIONAL

H. Salinas-Tapia<sup>1</sup>, A. L. Alvarez Mejía<sup>2</sup>, J. M. Becerril Lara<sup>2</sup>, J. A. Garcia Aragón<sup>1</sup>, B. M. Lopéz-Rebollar<sup>2</sup> y M. Narvaez-Saucedo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Profesor-Investigador, Centro Interamericano de Recursos del Agua, UAEM, Toluca, Estado de México, México.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, UAEM, Toluca, Estado de México, México.

E-mail: hsalinast@uaemex.mx, kmylha@hotmail.com, jone1512e@gmail.com

#### Introducción

Para la elaboración de proyectos de ingeniería hidráulica es importante determinar los gastos de diseño; y una de las maneras tradicionales de obtener esta información, es con la medición directa de eventos, sin embargo, la dificultad de recolectar esta información aunado la falta de equipo tecnológico y/o alto costo ha llevado a la ingeniería a utilizar medios indirectos, tales como la modelación. Cuya finalidad es identificar una variable ligada al escurrimiento que sea fácil de medir. La variable que resulta adecuada es la lluvia; de aquí nace la necesidad de utilizar los métodos llamados lluvia- escurrimiento.

A lo largo del tiempo se han dado avances en la recopilación de datos y modelado; que son utilizados para resolver problemas como: estimación de gastos de diseño, descargas en las salidas en cuencas, transporte de sedimentos, definición de zonas susceptibles a inundación. Sin embargo para conocer la hidrodinámica del cauce, el principal problema es la falta de datos, de ahí que, el aporte de este trabajo es demostrar que el uso de la simulación numérica utilizando un modelo hidráulico bidimensional que permita determinar el hidrógrama de una microcuenca, para realizar un análisis hidrodinámico del cauce, estimando las zonas de alto riesgo erosivo.

Existe una gran variedad de software para la modelación numérica de flujo en superficie libre tanto en 1D como 2D, tales como Iber 2D, HEC-RAS 1D y 2D, RIVER2D, BRISTARS, RMA-2, FESWMS, SSIM, etc. Iber es un modelo numérico bidimensional de simulación de flujo turbulento de lámina libre en régimen no-permanente, el cual brinda la posibilidad de simular una gran cantidad de escenarios con aplicación a la hidráulica y morfología fluvial (Bladé et al., 2014).

Trabajos realizados en diferentes países respaldan su aplicación, en Costa Rica evaluaron el riesgo de inundación del río Pejibaye (Gonzalo, 2011). En España a raíz de las inundaciones que se presentaron en Sarria, se realizó el diseño de soluciones de protecciones frente avenidas mediante modelización numérica. En México, se realizó una modelación hidrometeorológica en la cuenca del rio de la Sierra, en los estados de Chiapas y Tabasco, para evaluar el riesgo de inundación, pretendiendo disminuir las inundaciones en un 90% (Roblero, 2013).

#### **Problemática**

En los últimos años los municipios de Metepec y Mexicaltzingo, pertenecientes al Estado de México, México, se ha incrementado el proceso erosivo del cauce "Agua Bendita", ocasionando pérdidas importantes de terreno, y modificación drástica de las secciones transversales del cauce. En el año 2015 en el mes de julio se presentó la mayor afección en la zona, los grandes volúmenes de agua provocaron el desgajamiento de taludes en diferentes tramos del cauce y un importante arrastre de sedimentos, propiciando su desbordamiento, trayendo consigo inundaciones y bloqueo de importantes vialidades.

# Zona de estudio

Los escurrimientos del arroyo "Agua Bendita" pertenecen a la Región Hidrográfica 12 Lerma-Santiago, es una de las cuencas más grandes de México, la cual incluye parte de los estados de Guanajuato, Michoacán, Jalisco, Querétaro y Estado de México. Debido a su extensión la cuenca RH12 tiene una subdivisión en 12 regiones, el río de interés pertenece a la Subcuenca RH12Aa nombrada Almoloya del Río-Otzolotepec (figura 1). El tramo en estudio fue seleccionado considerando las zonas más afectadas por erosión, con longitud de 1.5 km a lo largo del río principal, sección transversal inicial 8 km aguas arriba del exutorio del cauce.

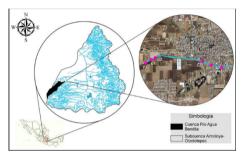


Figura 1.- Localización de la zona de estudio.

#### Metodología

Se utilizó un MDE (Modelo Digital de Elevaciones) tanto para la cuenca como para el tramo de rio en estudio, con resolución de 15 x15 m. La resolución se consideró suficiente para la simulación hidrológica, no así para el cauce, donde se realizó un levantamiento batimétrico del cauce para mejorar la resolución de MDE en el cauce. En este proceso su utilizo software ArcGIS, donde se acoto la zona, y se prepararon los formatos compatibles para su exportación en Iber.

Para alimentar el modelo simulación hidráulica Iber durante el proceso lluvia-escurrimiento, fue necesario determinar el hidrógrama de salida, para ello se obtuvó la precipitación máxima a 24 hrs asociada a diversos periodos de retorno. Se consideraron las estaciones cercanas a la zona, se realizó el análisis estadístico, ajustando los valores máximos de precipitación en 24 hrs a la función de distribución de probabilidad de Gumbel, mediante la herramienta computacional HIDESTAD VER 3.0 (Bâ et al., 2015). En la tabla 1 se presenta la precipitación máxima diaria anual. Para la rugosidad del cauce y de la cuenca, se consideran los grupos: taludes sin vegetación (TSV), taludes con vegetación media (TVM), taludes con vegetación alta (TVA), zona urbana, zona de enrocado, concreto, lecho del río.

Tabla 1.- Láminas de precipitación asociadas a periodos de retorno.

Probabilidad	Tr	Precipitación	Límite Inferior	Límite superior
0.5	2	31.926	28.120	36.732
0.8	5	43.286	36.876	49.695
0.9	10	50.807	42.149	59.464
0.95	20	58.021	47.085	68.957
0.98	50	67.359	53.392	81.326
0.99	100	74.357	58.086	90.628

#### Simulación con el modelo Iber

El modelo Iber se seleccionó debido a la diversidad de

herramientas incorporadas al modelo destacando que su uso es libre. Se plantearon escenarios de simulación que se engloban en 2 etapas: Simulaciones del Proceso Hidrológico y Simulación del Proceso Hidrodinámico. Ambas se realizaron para periodos de retorno de 2, 5 y 10 años.

Para el proceso hidrológico, se delimitó la cuenca en el MDE utilizando ArcGIS, definiendo las secciones del cauce por zonas dado que las características del mallado y asignación de parámetros es muy variable. Se definieron las condiciones de contorno, para el caso hidrológico, la condición de salida 2D en los elementos de la malla que componen el exutorio de la cuenca, se obtuvo el hidrógrama de salida. Y como condición de entrada se consideró los hietogramas de intensidad de lluvia en cada periodo de retorno (figura 2), también se asignó el sistema de pérdidas bajo el criterio SCS. Los usos de suelos se generaron en ArcGIS, y se importaron directo a Iber

Para la simulación hidrodinámica, las condiciones de contorno son dos, la Entrada 2D que corresponde al hidrograma generado por el módulo hidrológico (figura 3), y de Salida 2D los elementos que limitan el tramo de estudio por donde está la salida de flujo.

#### Resultados

Los resultados, han permitido demostrar que el modelo Iber es una herramienta eficiente para la realización de análisis hidrológicos. En la figura 2 se presentan los hietogramas para Tr = 2 años, y Tr = 5 años de la cuenca tributaria obtenidos con la metodología del hietograma simétrico, distribuyendo la duración de cada tormenta en intervalos de 10 min.

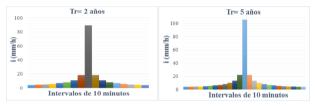
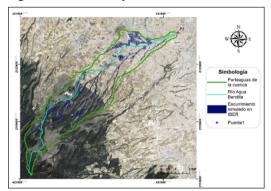


Figura 2.- Hietogramas para distintos periodos de retorno.

En la figura 3, se observa la formación de las corrientes a medida que transcurre la simulación del proceso lluvia-escurrimiento, dicha formación de las corrientes depende directamente del hietograma de intensidad de lluvia asociado a cada periodo de retorno. Con esta información, se generó el hidrograma de salida en la cuenca tributaria para diferentes periodos de retorno en el tramo del cauce en estudio incorporando el caudal base aforado (figura 4), el cual fue comparado con dos de las metodologías de hidrogramas Sintéticos más usados, el hidrograma sintético triangular SCS y el hidrograma sintético de Snyder.



**Figura 3.-** Corrientes generadas en la simulación del proceso hidrológico.

En la figura 5 se muestra el comportamiento de la altura del agua, y se observa que los valores del tirante oscila entre 0.15 a

1.32 m, considerando como gasto máximo en este periodo de retorno de 7.4 m3/s. La figura 6 muestra la variación de las velocidades. Es importante observar que los valores oscilan entre 0.6 y 4.8 m/s, sin embargo, el campo de velocidades en la zona A al interior de la curva alcanza los 4.2 m/s poniendo en peligro la estabilidad de las márgenes, por incremento de la erosión al pie del talud. Por otra parte, la zona D alcanza valores de hasta 4.8 m/, resultado de la reducción de sección lo cual ha provocado una fuerte erosión, modificando el fondo del cauce y poniendo en riesgo los taludes.

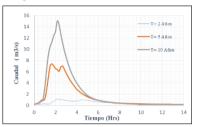


Figura 4.- Hidrógramas de salida en la cuenca tributaria.



Figura 5.- Tirantes máximos para Tr = 5 años. En 4 zonas.



**Figura 6.-** Velocidades máximas para Tr = 5 años. En 4 zonas.

### **Conclusiones**

Los hidrogramas obtenidos mediante el modelo de simulación Iber, resulto ser de gran utilidad ya que aportan una distribución del escurrimiento considerando intensidades de lluvia en toda la cuenca. Los resultados de la simulación hidrodinámica han permitido mostrar la variación de los tirantes y velocidades en cada zona, donde se observa que las zonas con mayores velocidades coinciden con lugares donde se observa mayor erosión.

La simulación demostró que las altas velocidades del flujo, son factores predominantes que condicionan los niveles de erosión.

## Referencias bibliográficas

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M. E., Dolz, J., and Coll, A. (2014). "Iber - Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos." Rev. int. Métodos Numér. Cálc. Diseño Ing. 30(1) pp.1–10.

Gonzalo, C. A. (2011). Propuesta metodológica de modelización hidrometeorológica e hidrodinámica enfocada a la ordenación del riesgo de inundación: Aplicación a la cuenca del río Pejibaye (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid.

Roblero, R. H. (2013). Modelación hidrometeorológica de áreas con riesgos de inundación en la cuenca del río La Sierra, en los estados Chiapas y Tabasco, México (Tesis de maestría). Colegio de Postgrados. México.