

## APLICACIÓN DE LA SIMULACIÓN MONTECARLO PARA LA OBTENCIÓN DE PROBABILIDADES DE DESBORDAMIENTO DE UN RÍO DE PLANICIE.

### APPLICATION OF THE MONTECARLO SIMULATION FOR OBTAINING PROBABILITIES OF OVERFLOW OF A PLANICIE RIVER.

Balladares-Sánchez M. Á.<sup>1\*</sup>, Pico-González B.<sup>2</sup>, Careta-Isordia A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Estudiante Doctoral. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, carretera Cunduacán-Jalpa KM. 1, Col. La Esmeralda, Cunduacán, Tabasco, México CP. 86690. Correo: miguel.balladares@ujat.mx

<sup>2,3</sup> Profesor Investigador de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

#### RESUMEN

Conocer las probabilidades de desbordamiento de un cuerpo de agua es vital para alimentar modelos probabilísticos. En casos de riesgo por inundación, estos modelos sirven de apoyo en la toma de decisiones. Se calcularon probabilidades de desbordamiento de un río de planicie aplicando simulación Montecarlo a partir de un evento conocido. La aplicación del método permitió calcular la probabilidad de desbordamiento hasta cinco días previos al suceso. El estudio se aplicó a un escenario de inundación ocurrido en la ciudad de Villahermosa Tabasco, México en 2007. Los resultados muestran la versatilidad del método al permitir introducir al cálculo de las probabilidades diferentes criterios de precisión.

Palabras clave: **decisiones, inundación, probabilidad y simulación.**

## ABSTRACT

Knowing the probabilities of overflow of a body of water is of vital importance to feed probabilistic models. Know the odds of overflow of a body of water is vital to feed some probabilistic models. In cases of flood risk, these models serve as support in decision-making. Odds of overflow of a river plain were calculated by applying Monte Carlo simulation from a known event. The application of the method allowed to calculate the probability of overflow up to five days prior to the event. The study was applied to a scenario of flood occurred in the city of Villahermosa Tabasco, Mexico in 2007. The results show the versatility of the method to allow to introduce different criteria of precision to the calculation of probabilities.

**Key words:** decisions, flood, probability and simulation

## INTRODUCCIÓN

En situaciones de riesgo, resulta primordial apoyar las decisiones generando información básica del evento como son los costos y las probabilidades de ocurrencia. En el caso de inundaciones, en donde se dan evacuaciones de lento desarrollo, decidir el momento idóneo para evacuar una población en riesgo tiene implicaciones económicas que dependen en primer lugar, del tiempo que las personas estarán fuera del área afectada, es decir, a mayor tiempo, mayores costos derivarán de la manutención y resguardo que los organismos oficiales de ayuda tendrán que disponer para solventar las necesidades básicas de las personas evacuadas [1 y 2]. Por otra parte, retardar demasiado la evacuación implica

mayores posibilidades de pérdidas humanas y mayores daños. Adicionalmente, evacuar una población y que el evento no suceda, tiene implicaciones sociales no deseables [3]. Ante tal problema de decisión conocer las probabilidades de inundación y los costos implicados ante los dos escenarios potenciales, es de vital importancia.

Los eventos de inundaciones tienen presencia a nivel mundial y generalmente tienen una mayor concentración en llanuras costeras, las cuales están irrigadas por ríos de planicie y son ricas en flora, fauna y otros recursos como petróleo y gas; mucha población emigra hacia estas zonas en busca del desarrollo [4 y 5]. Se carece de obras de protección complejas y si existen solo protegen ciertas zonas de interés establecidas por su importancia económica y estratégica para sostener ciertas actividades económicas como serían aquellas que se derivan de la explotación de petróleo y gas natural [6]. Cuando ocurren desbordamientos naturales en estas regiones generalmente los daños son cuantiosos [7 y 8]. Mitigar los daños por estos fenómenos requiere de acciones estructurales y no estructurales [2]. La disposición de información al momento de decidir el curso de acción en situaciones de desastre juega un papel importante en la reducción de las pérdidas humanas y económicas. Debido a esto, se han desarrollado investigaciones que permiten predecir la ocurrencia de las inundaciones, con la finalidad de tener un mayor conocimiento de las mismas y entregar datos para los sistemas de alerta. Los autores Tucci y Collischonn (2006) en [9], mencionan que la predicción de desbordamientos se ha convertido en un activo social y económico importante en la gestión de recursos hídricos; de tal manera que los modelos matemáticos cobran una gran importancia, constituyendo una forma de resolver los problemas hídricos teóricos [10]. En el análisis de escurrimientos, muchas de las predicciones que se

realizan dependen de enlaces muy simples, los cuales se establecen empíricamente entre la variable observada y una variable de la que existe interés en predecir [11]. En este marco, son útiles los métodos para predecir la ocurrencia de las inundaciones a través de modelos matemáticos, obtenidos a partir de análisis estadísticos [12]. Un método estadístico utilizado como apoyo para calcular la probabilidad de desbordamiento es el método Montecarlo, el cual permite resolver problemas físicos y matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias.

La generación de probabilidades de desbordamiento de diques apoyada por simulación estadística Montecarlo ha sido empleada con regularidad para desarrollar diversos modelos [13 y 14]. No obstante, en la definición de estas probabilidades se consideran diversas formas de falla y las características geométricas y constructivas de los diques [15 y 16]. Sin embargo, el desbordamiento de ríos de planicie en países en desarrollo, está determinado por situaciones menos complejas dado que en las llanuras costeras normalmente se carece de obras marginales sofisticadas y el desbordamiento se circunscribe al rebosamiento de los bordos naturales de los cauces. El desarrollo de modelos aplicados a este tipo de desbordamiento ha sido abordado con menor intensidad [17, 18 y 19].

En esta investigación se aplica la simulación estadística Montecarlo para generar las probabilidades de desbordamiento de un río de planicie a partir de la distribución Normal de los tirantes de un evento conocido. Mediante la aplicación de la simulación estadística descrita se generaron probabilidades para horizontes de planificación de cinco, cuatro, tres, dos y un día de anticipación al evento. Los resultados de su aplicación en el cálculo de las probabilidades de desbordamiento,

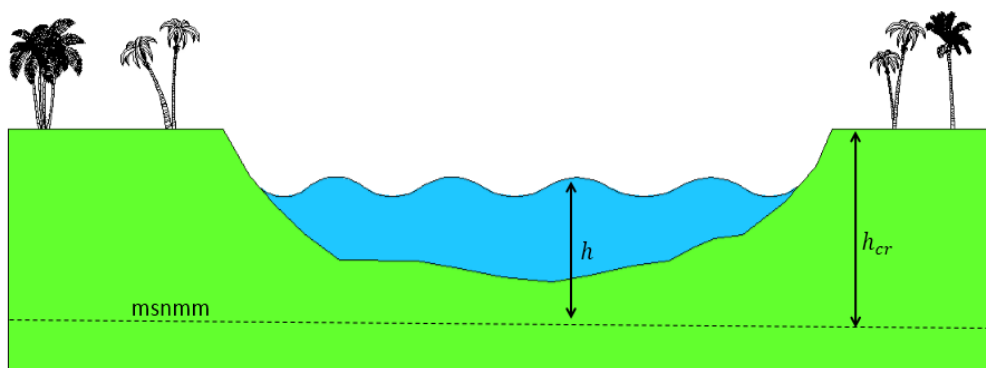
apoyará la toma de decisiones y aportará a la socialización de estos procesos en las instancias gubernamentales de auxilio a la población en caso de desastres.

**Hipótesis:** es factible determinar las probabilidades de desbordamiento de un río de planicie mediante Simulación estadística Montecarlo para diferentes horizontes de planificación y grados de precisión para apoyar decisiones bajo riesgo.

## DESARROLLO DE LA TEORÍA

### Aspectos generales

Las inundaciones y los problemas derivados de estos eventos naturales, se incrementan de forma paralela al crecimiento poblacional y económico en las ciudades, ocasionando un incremento en las condiciones de vulnerabilidad y los costos en situaciones de emergencia [20]. La mayoría de las inundaciones ocurren en zonas planas y/o cercanas a los cauces de los ríos [21]. Esto sucede cuando el agua supera los bordos naturales del cauce y cubren zonas aledañas a éste durante un cierto tiempo [22]. Para los casos específicos de desbordamientos de ríos de planicie el mejor criterio para determinar la probabilidad de inundación, se basa en la probabilidad de que el nivel del río ( $h$ ) sobrepase el nivel de la cresta más alta ( $h_{cr}$ ) del bordo del río (overtopping). [23](Ver Figura. 1).



**Fig. 1.** Nivel natural de un cauce natural de río de planicie referido a  $h$ ,  $h_{cr}$  en metros sobre el nivel medio del mar (msnmm).

Para el caso de un dique o bordo, la función de confiabilidad ( $Z$ ) se define como

$$Z = h_{cr} - h \quad (1)$$

La probabilidad de falla o desbordamiento ( $P_f$ ) es

$$P_f = P(Z \leq 0) = P(h \geq h_{cr}) \quad (2)$$

$$P(Z > 0) = 1 - P_f \quad (3)$$

La probabilidad de inundación (o probabilidad de falla) se puede resumir como

$$P_f = P(Z \leq 0) = P(h \geq h_{cr}) = \int_{h_{cr}}^{\infty} f(h)dh \quad (4)$$

Donde:

$f(h)$  es la función de distribución probabilística del nivel del agua ( $h$ )

Por lo tanto, la probabilidad de inundación, entendida que ésta ocurre cuando un dique o bordo falla por la condición  $h_{cr} - h \leq 0$ , obtenida de la predicción de  $h$ , queda como sigue

$$P_{f/h_{pred}} = \int_{h_{cr}}^{\infty} f(h/h_{pred}) dh = 1 - F(h/h_{pred}) \quad (5)$$

Donde

$f(h/h_{pred})$  es la función de distribución probabilística del nivel del agua  $h$ , obtenida de la predicción de la misma ( $h_{pred}$ )

$F(h/h_{pred})$  es la función de probabilidad acumulada del nivel del agua  $h$ , obtenida de su predicción  $h_{pred}$

**Procedimiento de obtención de la probabilidad**

En primera instancia es necesario contar con los registros de los tirantes o niveles de agua  $h$  que hayan rebasado el nivel del bordo o dique y que hayan provocado una inundación histórica. Ello permite obtener una distribución probabilística representativa; para el caso de estudio se usaron los datos de un evento conocido (inundación de 2007 en Villahermosa, Tabasco, México) y la distribución Normal [24].

La función de probabilidad acumulada de  $(\Delta h)_{pred}$ , como una función del tiempo de predicción distribuida normalmente se indica en la ecuación (6) y representa la solución numérica de la ecuación (5) .

$$f \left( (\Delta h)_{pred}(t_j) \right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta h}(t_j)} \exp \left( -\frac{\left( (\Delta h)_{pred} - \mu_{\Delta h}(t_j) \right)^2}{2\sigma_{\Delta h}(t_j)^2} \right) \quad (6)$$

Dondef  $(\Delta h)_{pred}t_j$  es la función de probabilidad acumulada de  $(\Delta h)_{pred}$  como función del tiempo  $t_j[-]$  y

$(\Delta h)_{pred}$       Grado de precisión ( [cm])

$\mu_{\Delta h}$             (bias) Sesgo de  $\Delta h$  [cm]

$\sigma_{\Delta h}$             (r.m.s.) Desviación estándar de  $\Delta h$  [cm]

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Zona de estudio, escenario de inundación

En esta sección se aplicará simulación estadística Montecarlo para apoyar la determinación de las probabilidades de desbordamiento de un río de planicie. El área seleccionada se denomina Distrito I, de la ciudad de Villahermosa Tabasco, México con una superficie de 136.7 hectáreas [25] y una población de 20 000 habitantes ubicadas en zonas de riesgo alto, medio y bajo de acuerdo al Atlas de Riesgo del lugar.

El escenario de inundación o evento histórico seleccionado es similar al ocurrido en Villahermosa Tabasco en el año 2007 en el cual se vieron afectadas aproximadamente 12,513 personas [26]. Este escenario se asocia a un periodo de retorno de cien años ( $Tr = 100$ ). Los datos que se tomaron para efectos de determinar las probabilidades de desbordamiento, tienen su origen en el registro histórico de la estación hidrométrica “Gaviotas II” ubicada a 200 m aguas arriba de la zona de estudio (Figura 2). Para efectos de cálculo de las probabilidades se consideró (tomando en cuenta las versiones periódicas de la fecha) que el punto de desbordamiento ocurrió en el malecón de la ciudad en la cota 7.50 mts sobre el nivel medio del mar (msnmm), la cual se toma como el valor  $h_{cr}$ .





**Fig. 2.** Área de estudio y zona afectada. Adaptada de Google Earth.

### Características del evento

En el año 2007, el estado de Tabasco, en México, sufrió la inundación más grave de los últimos cincuenta años [27], originado por la presencia de la tormenta tropical Noel y el frente frío proveniente de los Estados Unidos de América de acuerdo a lo documentado en el Sistema Meteorológico Nacional (2008) [28] presentado en el periodo del 29 de octubre al 1° de noviembre. Como consecuencia, en sólo cuatro días se registró en la región una precipitación equivalente a la de un año [29]. Estas precipitaciones ocasionaron el desbordamiento de los ríos de la zona ocasionando cuantiosos daños a la infraestructura del estado de Tabasco [30].



Fig. 3. Foto de la afectación de la inundación de 2007 (Tomada de ERN, 2007).

### Aplicación de la simulación estadística

Con el fin de determinar las probabilidades de desbordamiento se evaluaron diferentes escenarios hasta cinco días previos mediante la aplicación de la simulación estadística; para cada escenario de predicción se generaron datos sintéticos de predicción necesarios para el estudio (ver Tabla 1), a partir de estos datos de predicción para cada día se obtuvo la *media aritmética* (bias  $\Delta h$ ) y la *desviación estándar* (r.m.s.  $\Delta h$ ) asociadas a un número de datos ( $n=25$ ) (ver Tabla 2). Los datos generados asocian el gasto y el tirante, cada vez que se requiera determinar la probabilidad del desbordamiento como el estudio realizado por Barendregt (2002) en [31], en el que evaluaron los fallos y el grado de previsibilidad de una manera cualitativa con respecto a los diques en Holanda, al predecir el fallo con días de anticipación. También se definieron los intervalos de precisión antes del umbral de desbordamiento ( $h_{cr}$ ) necesarios para cada día de acuerdo a la evolución de los tirantes observado en el punto para el cual se requiere calcular la probabilidad de desbordamiento. Estos intervalos pueden ser definidos por los comités

intergubernamentales de decisión que normalmente toman el control de la situación cuando se avecina un evento de este tipo.

**Tabla 1.** Simulación para cinco días previos, aplicando simulación estadística Montecarlo a partir de los niveles de agua medidos en el punto de desbordamiento ( $h_{cr} = 7.50$  m).

Fecha		Mediciones			5 días de predicción			4 días de predicción			3 días de predicción			2 días de predicción			1 día de predicción		
Date	Water level	Date	Water level	Δh	Date	Water level	Δh	Date	Water level	Δh	Date	Water level	Δh	Date	Water level	Δh			
[dd-mm-yy]	[m+NAP]	[dd-mm-yy]	[m+NAP]	[m]	[dd-mm-yy]	[m+NAP]	[m]	[dd-mm-yy]	[m+NAP]	[m]	[dd-mm-yy]	[m+NAP]	[m]	[dd-mm-yy]	[m+NAP]	[m]			
21/10/2007	5.45										19/10/2007	4.96	0.49	20/10/2007	5.1	0.35			
22/10/2007	5.46							19/10/2007	5.55	-0.09	20/10/2007	4.76	0.7	21/10/2007	5.67	-0.21			
23/10/2007	5.41				19/10/2007	5.37	0.04	20/10/2007	5.25	0.16	21/10/2007	5.17	0.24	22/10/2007	5.24	0.17			
24/10/2007	5.69	19/10/2007	5.26	0.43	20/10/2007	5.82	-0.13	21/10/2007	5.7	-0.01	22/10/2007	5.74	-0.05	23/10/2007	6.11	-0.42			
25/10/2007	5.92	20/10/2007	5.38	0.54	21/10/2007	5.9	0.02	22/10/2007	5.76	0.16	23/10/2007	6.04	-0.12	24/10/2007	6.36	-0.44			
26/10/2007	6.1	21/10/2007	5.94	0.16	22/10/2007	6	0.1	23/10/2007	5.95	0.15	24/10/2007	6.23	-0.13	25/10/2007	5.83	0.27			
27/10/2007	6.22	22/10/2007	6.26	-0.04	23/10/2007	6.5	-0.28	24/10/2007	6.25	-0.03	25/10/2007	6.16	0.06	26/10/2007	6.55	-0.33			
28/10/2007	6.26	23/10/2007	6.36	-0.1	24/10/2007	6.67	-0.41	25/10/2007	6.4	-0.14	26/10/2007	6.29	-0.03	27/10/2007	6.42	-0.16			
29/10/2007	6.54	24/10/2007	6.63	-0.09	25/10/2007	6.69	-0.15	26/10/2007	6.73	-0.19	27/10/2007	6.91	-0.37	28/10/2007	6.78	-0.24			
30/10/2007	6.77	25/10/2007	6.74	0.03	26/10/2007	6.97	-0.2	27/10/2007	6.9	-0.13	28/10/2007	6.64	0.13	29/10/2007	6.76	0.01			
31/10/2007	7.15	26/10/2007	7.16	-0.01	27/10/2007	7.17	-0.02	28/10/2007	7.17	-0.02	29/10/2007	7.19	-0.04	30/10/2007	7.18	-0.03			
01/11/2007	7.64	27/10/2007	7.69	-0.05	28/10/2007	7.62	0.02	29/10/2007	7.68	-0.04	30/10/2007	7.66	-0.02	31/10/2007	7.65	-0.01			
02/11/2007	7.81	28/10/2007	7.76	0.05	29/10/2007	7.73	0.08	30/10/2007	7.93	-0.12	31/10/2007	7.85	-0.04	01/11/2007	7.87	-0.06			
03/11/2007	7.73	29/10/2007	7.76	-0.03	30/10/2007	7.74	-0.01	31/10/2007	7.77	-0.04	01/11/2007	7.78	-0.05	02/11/2007	7.77	-0.04			
04/11/2007	7.51	30/10/2007	7.51	0	31/10/2007	7.51	0	01/11/2007	7.51	0	02/11/2007	7.51	0	03/11/2007	7.51	0			
05/11/2007	7.19	31/10/2007	7.23	-0.04	01/11/2007	7.21	-0.02	02/11/2007	7.22	-0.03	03/11/2007	7.17	0.02	04/11/2007	7.15	0.04			
06/11/2007	6.92	01/11/2007	7.05	-0.13	02/11/2007	6.96	-0.04	03/11/2007	6.91	0.01	04/11/2007	7.02	-0.1	05/11/2007	7.03	-0.11			
07/11/2007	6.7	02/11/2007	6.82	-0.12	03/11/2007	6.65	0.05	04/11/2007	6.64	0.06	05/11/2007	6.77	-0.07	06/11/2007	6.81	-0.11			
08/11/2007	6.5	03/11/2007	6.44	0.06	04/11/2007	6.58	-0.08	05/11/2007	6.68	-0.18	06/11/2007	6.55	-0.05	07/11/2007	6.25	0.25			
09/11/2007	6.34	04/11/2007	6.54	-0.2	05/11/2007	5.96	0.38	06/11/2007	6.23	0.11	07/11/2007	5.98	0.36	08/11/2007	6.1	0.24			
10/11/2007	6.22	05/11/2007	6.34	-0.12	06/11/2007	6.23	-0.01	07/11/2007	6.43	-0.21	08/11/2007	6.68	-0.46	09/11/2007	6.32	-0.1			
11/11/2007	6.06	06/11/2007	6.14	-0.08	07/11/2007	6.61	-0.55	08/11/2007	6.21	-0.15	09/11/2007	6.29	-0.23	10/11/2007	6.16	-0.1			
12/11/2007	5.89	07/11/2007	5.39	0.5	08/11/2007	6.08	-0.19	09/11/2007	5.6	0.29	10/11/2007	5.73	0.16	11/11/2007	5.75	0.14			
13/11/2007	5.66	08/11/2007	6.32	-0.66	09/11/2007	5.85	-0.19	10/11/2007	5.38	0.28	11/11/2007	5.14	0.52	12/11/2007	5.77	-0.11			
14/11/2007	5.46	09/11/2007	5.78	-0.32	10/11/2007	6.13	-0.67	11/11/2007	6.3	-0.84	12/11/2007	5.49	-0.03						
15/11/2007	5.23	10/11/2007	5	0.23	11/11/2007	5.84	-0.61	12/11/2007	5.63	-0.4									
16/11/2007	5.03	11/11/2007	4.34	0.69	12/11/2007	5.2	-0.17												
18/11/2007	4.78	12/11/2007	4.81	-0.03															
			bias Δh [m]	<b>0.028</b>			bias Δh [m]	<b>-0.121</b>					bias Δh [m]	<b>0.035</b>			bias Δh [m]	<b>-0.052</b>	

---

r.m.s. $\Delta h$ [m]	<b>0.283</b>	r.m.s. $\Delta h$ [m]	<b>0.238</b>	r.m.s. $\Delta h$ [m]	<b>0.227</b>	r.m.s. $\Delta h$ [m]	<b>0.262</b>	r.m.s. $\Delta h$ [m]	<b>0.21</b>
--------------------------	--------------	--------------------------	--------------	--------------------------	--------------	--------------------------	--------------	--------------------------	-------------

---

A continuación, en la tabla 2, se presentan los datos obtenidos a partir de la Tabla 1.

**Tabla 2.** Datos obtenidos de la simulación para días cinco de predicción.

Modelo	Días de predicción				
	5 días	4 días	3 días	2 días	1 día
<b>Rio de planicie</b>	bias $\Delta h = 2.8$ cm	bias $\Delta h = - 12.1$ cm	bias $\Delta h = - 5.6$ cm	bias $\Delta h = 3.5$ cm	bias $\Delta h = - 5.2$ cm
	r.m.s. $\Delta h = 28.3$ cm	r.m.s. $\Delta h = 23.8$ cm	r.m.s. $\Delta h = 22.7$ cm	r.m.s. $\Delta h = 26.2$ cm	r.m.s. $\Delta h = 21$ cm
	n = 25	n = 25	n = 25	n = 25	n = 25

Luego las probabilidades de inundación a 5 días previos, considerando diferentes niveles de precisión se obtienen de sustituir en la ecuación (6) los valores mostrados en la tabla 2 y los valores de precisión establecidos en la tabla 3.

**Tabla 3.** Precisión establecida para los días de simulación.

Tiempo de predicción (días)	Precisión deseada $\Delta h$ (cm)
5	50
4	35
3	26
2	18
1	7

Las probabilidades para cinco días previos se presentan a continuación en la Tabla 4. Para esta condición se establece que  $\mu(t_j)=0$ , en virtud de que el modelo se basa en la espera de que, de manera central la diferencia entre el

nivel del río ( $h$ ) y el nivel de la cresta más alta ( $h_{cr}$ ), sea 0, como se deduce en la ecuación (1).

**Tabla 4.** Probabilidades de inundación para cinco días previos y diferentes grados de precisión del cálculo

Tiempo de espera de predicción (j) [días]	$h_{cr}$ [cm + NAP]	$\mu (t_j)$ [cm]	$\sigma (t_j)$ [cm]	$\Delta h_{cr}$ [cm]	$P_f$ [-]
5	750	0	28.28	50	0.039
4	750	0	23.8	35	0.071
3	750	0	22.7	26	0.126
2	750	0	26.2	18	0.246
1	750	0	21.0	7	0.369

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Determinar las probabilidades hasta cinco días antes de un posible suceso, se presenta aquí como un ejercicio para ejemplificar el método. Sin embargo, en escenarios reales, el punto crítico de decisión se da generalmente entre los días tres y dos antes de cualquier evento. Lo anterior puede entenderse desde dos vertientes: en primer lugar, los pronósticos o las probabilidades de que suceda un evento natural pueden cambiar de un día para otro [32]. Por otra parte, de acuerdo a la experiencia internacional, cinco y cuatro días son más que suficientes para evacuar sin contratiempos. En la mayoría de los casos se puede decidir *retardar* la evacuación uno o dos días a partir del día cinco en espera de mayor información [33].

Por otra parte, de acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 4, las probabilidades del suceso aumentan conforme disminuye el intervalo de días previos al evento. Esto es natural en el cálculo de las probabilidades con

márgenes de precisión cerrados. Debe recordarse que estos márgenes dependen del criterio de los comités de decisión y su virtual aversión o costumbre para manejar el riesgo. No obstante, otras posibilidades de análisis nos pueden conducir a considerar intervalos de precisión más holgados y continuos durante los días previos, se muestra a continuación:

**Tabla 5.** Precisión (20 cm.) establecida para cuatro días de simulación

Tiempo de predicción (días)	Precisión deseada $\Delta h$ (cm)
4	20
3	20
2	20
1	20

Las probabilidades para este intervalo de precisión de 20 cm. Queda como se muestra a continuación:

**Tabla 6.** Probabilidad obtenida para cuatro días y 20 cm. De precisión

Para cuatro días de anticipación	$h_{cr}$ [cm + Nap]	$\mu (t_j)$ [cm]	$\sigma (t_j)$ [cm]	$\Delta h_{cr}$ [cm]	$P_f$ [-]
4	750	0	23.8	20	0.200
3	750	0	22.7	20	0.189
2	750	0	26.2	20	0.223
1	750	0	21.0	20	0.170

Este resultado nos llevaría a reconsiderar cualquier decisión en términos del primer cálculo de probabilidades mostrados en la tabla 4.

Sea cual sea el criterio adoptado, la probabilidad calculada puede emplearse para alimentar modelos de apoyo a las decisiones desde los



modelos muy simples como las tablas de pago [34] hasta los más complejos como los árboles de decisión propuestos por Clement (1995) en [35].

## CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados mostrados mediante el caso de aplicación, resulta factible calcular la probabilidad de desbordamiento de un río de planicie a partir de los registros de un evento conocido aplicando la generación sintética de datos mediante simulación Montecarlo. Las probabilidades de desbordamiento varían de forma considerable cuando se consideran diferentes criterios de precisión, demostrando que el método es bastante adaptable a los criterios de los comités de decisión.

La presente investigación abre la posibilidad de profundizar en el estudio de las decisiones bajo riesgo y muestra una aplicación simple de la generación sintética de datos mediante simulación Montecarlo.

**REFERENCIAS**

- [1]. Baró-Suárez, J. E., Díaz-Delgado, C., Esteller-Alberich, M. V. & Calderón, G., (2007). Curvas de daños económicos provocados por inundaciones en zonas habitacionales y agrícolas de México. Parte II: caso de estudio en la cuenca alta del río Lerma, México.. *Ingeniería hidráulica en México*, 22(3), 71-85.
- [2]. Ynestroza, M. Á. P. & Rojas, I. C. L., (2009). Metodologías para cuantificar el riesgo de inundación en planicies inundables. *Revista de Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 30(3),11-20.
- [3]. Vergara Tenorio, M. d. C. et al., (2011). La conceptualización de las inundaciones y la percepción del riesgo ambiental. *Política y cultura*, Volume 36, 45-69.
- [4]. Tockner, K. & Stanford, J. A., (2002). Riverine flood plains: present state and future trends. *Environmental conservation*, 29(03), 308-330.
- [5]. Montoya, J. V., Castillo, M. M. & Sanchez, L., (2011). The importance of periodic floods for the functioning and conservation of large tropical floodplain rivers: studies from the orinoco basin.. *nterciencia*, 36(12), 900-907.
- [6]. Acinas Acinas, M., (2007). Información a la población en situaciones de emergencia y riesgo colectivo. *Psychosocial Intervention*, 16(3), 303-321.
- [7]. Garnica Peña, R. J. & Alcántara Ayala, I., (2004). Riesgos por inundación asociados a eventos de precipitación extraordinaria en el curso bajo del río Tecolutla, Veracruz. *Investigaciones geográficas*, Volume 55, 23-45.
- [8]. Tanako, T.,( 2012). BM pide abrir presupuestos a desastres. *Recuperado el 6 de abril de 2014, de CNexpansión: [http:// www.cnnexpansion.com/economia/2012/06/16/bm-pide-abrir-presupuestos-a-desastres](http://www.cnnexpansion.com/economia/2012/06/16/bm-pide-abrir-presupuestos-a-desastres).*

- [9]. Tucci, C. & W., C., (2006). Predicción de crecidas. *Boletín de la Organización Meteorológica Mundial*, 55(3), 179-184.
- [10]. Cea, L., Vázquez-Cendón, M. E. & Puertas, J., (2008). Modelación matemática en lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable. *Jornadas Técnicas sobre Hidráulica Fluvial, CEDEX–Ministerio de Fomento*.
- [11]. OMM, (1994). Guía de Prácticas hidrológicas. *Consultado el 25 de abr. 2009. [http://www.bom.gov.au/hydro/wr/wmo/guide\\_to\\_hydrological](http://www.bom.gov.au/hydro/wr/wmo/guide_to_hydrological)*, Quinta edición (168), pp. . CAPÍTULO 41:581-617.
- [12]. Kalyanapu, A. J., Judi, D. R., McPherson, T. N. & Burian, S. J., (2012). Monte Carlo-based flood modelling framework for estimating probability weighted flood risk. *Journal of Flood Risk Management*, 5(1), 37-48.
- [13]. Vrijling, J. K., Vrouwenvelder, A. C. W. M., Jonkman, I. S. & de Bruijn, I. K., (2003). Probabilistic risk assessment of a system of dike ring areas.
- [14]. Van Looveren, R. G. T., Blanckaert, J., Verelst, K. & Peeters, P., (2016). Estimating probability of dike failure by means of a Monte Carlo approach. *Sustainable Hydraulics in the Era of Global Change*, 896-903.
- [15]. Möllmann, A. F. D. & Vermeer, P. A., (2007). Reliability analysis of a dike failure. *In Proceedings of the 18th European Young Geotechnical Engineers' Conference*.
- [16]. Naulin, M. K. A. & Oumeraci, H., (2011). Failure probability of flood defence structures/systems in risk analysis for extreme storm surges. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32), p. 13.
- [17]. Huthoff, F. & Stijnen, J. W., (2005). Efficiency of emergency retention areas along the river Rhine: Monte Carlo simulations of a 1D flow model. *ISSH - Stochastic Hydraulics 2005 - 23 and 24 May 2005 - Nijmegen - The Netherlands*, 2005(23).

- [18]. Natale, L. & Savi, F., (2007). Monte Carlo analysis of probability of inundation of Rome. *Environmental Modelling & Software*, 22(10), 1409-1416.
- [19]. Charalambous, J., Rahman, A. & Carroll, D., (2013). Application of Monte Carlo simulation technique to design flood estimation: a case study for North Johnstone River in Queensland, Australia. *Water resources management*, 27(11), 4099-4111.
- [20]. Fokkens, B., (2005). The dutch strategy for safely and river flood prevention, institute for inland water management and water treatment, the Netherlands.
- [21]. OMM, O. M. M., (2006). Aspectos ambientales de la gestión integrada de crecidas. APFM Documento Técnico N°3. Serie políticas de gestión de crecidas.
- [22]. CENAPRED, C. N. d. P. d. D., (2001). *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México, Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana*. México. ISBN: 970-628-593-8: s.n.
- [23]. TUDelft, (2004). Probabilistic Evacuation Decision model for River Floods in the Netherlands. *Delft university of technology Faculty of Civil Engineering and Geosciences*.
- [24]. Azofeifa, C. E., (2004). Aplicación de la Simulación Monte Carlo en el cálculo del riesgo usando Excel. *Tecnología en Marcha*, 17(1), 97-109.
- [25]. CENTRO, M., (2009). *Atlas de Riesgo del Municipio del Centro*. [Online] Available at: [WWW.VILLAHERMOSA.GOB.MX/PROTEC\\_CIVIL/ATLAS\\_DE\\_RIESGO.PD](http://WWW.VILLAHERMOSA.GOB.MX/PROTEC_CIVIL/ATLAS_DE_RIESGO.PD)  
[Accessed Villahermosa: SEDESOL. Recuperado el 10 de octubre de 2013].
- [26]. CEPC-TABASCO, (2014). [HTTP://PROTECCIONCIVIL.TABASCO.GOB.MX/](http://PROTECCIONCIVIL.TABASCO.GOB.MX/). [Online] [Accessed Recuperado el 2 de febrero de 2014, de protección Civil Tabasco].

- [27]. Rivera, T. F., (2009). *La inundacion de 2007 en Tabasco, México: evolución de niveles de agua*. s.l.:s.n.
- [28]. María, P. & Torre, J. L. L. d. I., (2010). Causas de un desastre: Inundaciones del 2007 en Tabasco, México.. *Journal of LAtin American Geography, 9 (2) Conference of LAtin Americanist Geographers*, p. 73\_98.
- [29]. SMN, (2008). *Lámina de lluvia normal mensual*, s.l.: s.n.
- [30]. Arreguín, C. et al., (2014). Análisis de las inundaciones en la planicie tabasqueña en el periodo 1995.2010. *Tecnología y ciencia del agua, 5 (3)*, 05-32.
- [31]. Barendregt, A. et al., (2002). Evacuatie bij dreigende overstromingen (in Dutch).
- [32]. Meza-Padilla, R. et al, (2015). Evaluación de la marea de tormenta en sitios con escasez de datos: río Pánuco México. *RIBAGUA, 2(2)*, pp. 61-70.
- [33]. Friesen, (2004). "*Probabilistic Evacuation Decision Model for River Floods in the Netherlands*", Holanda: Delf University.
- [34]. Balladares, et al, (2016). Un primer acercamiento al problema de decisión en emergencias, mediante tablas de pago: caso práctico aplicado en Tabasco, México.. *Satregy, Technolgy and Sociaty, 2(2)*, 94-119.
- [35]. Duke University, (1995). An introduction to decision analysis.. In: D. University, ed. *Hard decisions*. Duke E.U.: Duke University, 24-27.

