

Modelación numérica hidrodinámico-hidrológica en zonas de inundación con presencia de infraestructura

• Israel E. Herrera-Díaz* •
Universidad de Guanajuato, México

*Autor de correspondencia

• Clemente Rodríguez-Cuevas •
Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México

• Carlos Couder-Castañeda •
Instituto Politécnico Nacional, México

• José R. Gasca-Tirado •
Universidad de Guanajuato, México

Resumen

Herrera-Díaz, I. E., Rodríguez-Cuevas, C., Couder-Castañeda, C., & Gasca-Tirado, J. R. (enero-febrero, 2015). Modelación numérica hidrodinámico-hidrológica en zonas de inundación con presencia de infraestructura. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(1), 139-152.

Se presenta la modelación numérica computacional de la hidrodinámica superficial e hidrológica de la zona de estudio donde se pretende construir infraestructura para la exploración de hidrocarburos en las márgenes del río Grijalva, México; para ello se muestra el análisis de la información meteorológica, determinando los valores de intensidad de precipitación, temperaturas, evaporación y una estimación de los gastos, correspondiente al año 2014; las zonas de inundación se estimaron con el uso de programas desarrollados en *Fortran* y *Matlab*, que resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes-Reynolds para flujos a superficie libre y la intensidad de precipitación con la distribución de Gumbel, con parámetros estimados mediante el método de Momentos Ponderados con Probabilidad (MPP), con los cuales, mediante una malla numérica de la topografía, en conjunto con los valores meteorológicos, como condiciones iniciales y forzantes, se determina la magnitud de la inundación del área de estudio, así como la obtención de gastos, velocidades y el funcionamiento hidráulico de las obras de mitigación propuestas para preservar el balance hidrológico del sistema.

Palabras clave: zonas de inundación, modelos hidrodinámicos, modelos hidrológicos, río Grijalva.

Abstract

Herrera-Díaz, I. E., Rodríguez-Cuevas, C., Couder-Castañeda, C., & Gasca-Tirado, J. R. (January-February, 2015). Numerical Hydrodynamic-Hydrological Modeling in Flood Zones Containing Infrastructure. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(1), 139-152.

The computational numerical modeling of the surface hydrodynamics and hydrology of the study area is presented, where the construction of infrastructure to explore hydrocarbons is planned on the banks of the Grijalva River, Mexico. Meteorological information is analyzed to determine precipitation intensity, temperatures, evaporation and flows for the year 2014. Flood zones are estimated using programs developed in *Fortran* and *Matlab* to solve the Navier-Stokes-Reynolds equation for free surface flows. The intensity of precipitation was obtained with the Gumbel distribution with parameters estimated using probability weighted moments (PWM). Based on this, the magnitude of the flooding in the study area was obtained according to a numerical grid of the topography along with meteorological values such as initial and forcing conditions. Flows, velocities and the hydraulic functioning of mitigation works proposed to preserve the hydrological balance of the system were also obtained.

Keywords: Flood zones, hydrodynamic models, hydrological models, Grijalva River.

Recibido: 19/05/14
Aceptado: 07/10/14

Introducción

La exploración de hidrocarburos en México es una de las principales labores de la industria de los energéticos. Contar con estudios que proporcionen información veraz y oportuna es primordial para una acertada toma de decisiones, ya que genera un panorama actualizado sobre aspectos técnicos y socioeconómicos que influyen y coinciden en un mismo espacio-tiempo.

Una de las herramientas que están contribuyendo a los estudios previos hidrológicos son los modelos numéricos computacionales, aplicando la dinámica de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés), el cual constituye una aproximación en el estudio de las ecuaciones de la dinámica de fluidos que se utilizan para describir diferentes fenómenos físicos relacionados con el movimiento de los fluidos, como los producidos por los flujos compresibles e incompresibles.

Este trabajo radica en acoplar un modelo numérico hidrodinámico y un modelo numérico hidrológico para determinar el funcionamiento hidrodinámico de la zona propuesta para la colocación de pozos de exploración o explotación, así como de la infraestructura de proyecto (camino, accesos, puentes, etc.); se tiene conocimiento previo de que la zona se comporta como una llanura de inundación por sus características topográficas, hidráulicas y geohidrológicas, por lo que se plantea como objetivo secundario analizar medidas de mitigación, para no alterar de forma sustancial el balance hidrodinámico de la zona seleccionada.

Localización y características de la zona de estudio

El sitio de estudio se encuentra en el margen izquierdo del río Chilapa o Grijalva en el estado de Tabasco, México (figura 1), donde está

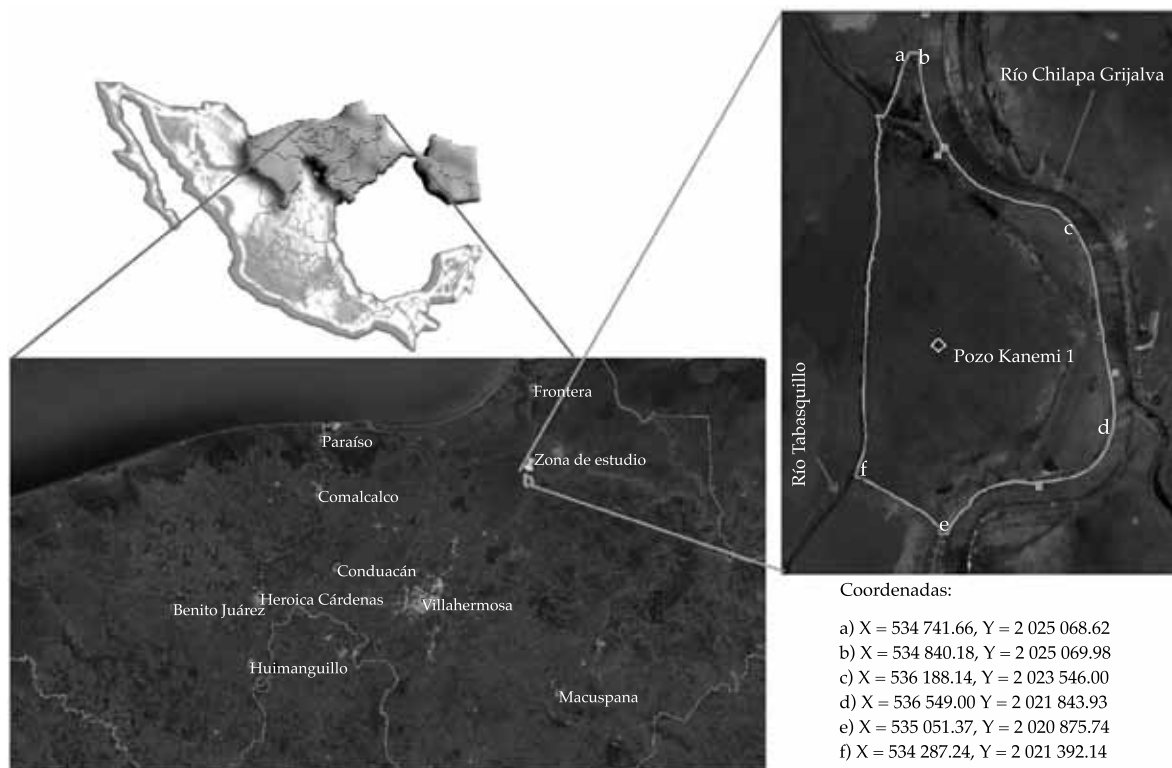


Figura 1. Localización de la zona de estudio (municipio de Centla, estado de Tabasco, México).

limitada por un polígono formado por canales en la parte inferior y superior, así como del río Tabasquillo en el extremo izquierdo. Existe una obra civil, la cual se ubica en la parte central de la planicie que forma el sistema y es el objetivo principal del estudio.

El trazo del camino propuesto hacia las instalaciones proyectadas del pozo se presenta en la figura 2. En el camino, al ser nuevo en el sistema ambiental, se contempla el uso de pasos de agua o alcantarillas para permitir el flujo hidrológico del sistema sin que presente alteraciones sustanciales a su estado original. La ubicación y el dimensionamiento de éstos se determinan en función de las magnitudes de velocidades calculadas y de los gastos provenientes de los resultados de la simulación y deben garantizar que el flujo hidrológico no se interrumpa y siga su cauce natural, a fin de dar cumplimiento a la NOM-022-SEMARNAT-2013.

Desde el punto de vista hidráulico, se considera que la morfología general de la zona es sensiblemente constante en el tiempo; esto es, la zona de inundación permanece de forma continua cubierta por vegetación en su totalidad, por lo que las magnitudes de velocidades del flujo superficial no son considerables como para alterar la morfología del terreno y, por consecuencia, ésta se considera invariable para efectos de simulación.

La información para la precipitación se recopiló de las cartas de isoyetas (SCT-DGST, 2013) correspondientes a periodos de retorno, intensidad de lluvia y duración de la misma, para poder modelar el flujo superficial en diferentes periodos de retorno y de intensidad de lluvia; la información se condensó y se aplicaron aquellas lluvias con duración de 30 minutos para distintos periodos de retorno (figuras 3a a 3e).

Se considera un coeficiente de escurrimiento que varía de 15 a 25%, pues presenta una permeabilidad media y baja, en función del material que está constituido el suelo, además de considerar una vegetación de densidad media en promedio para todo el sistema ambiental.

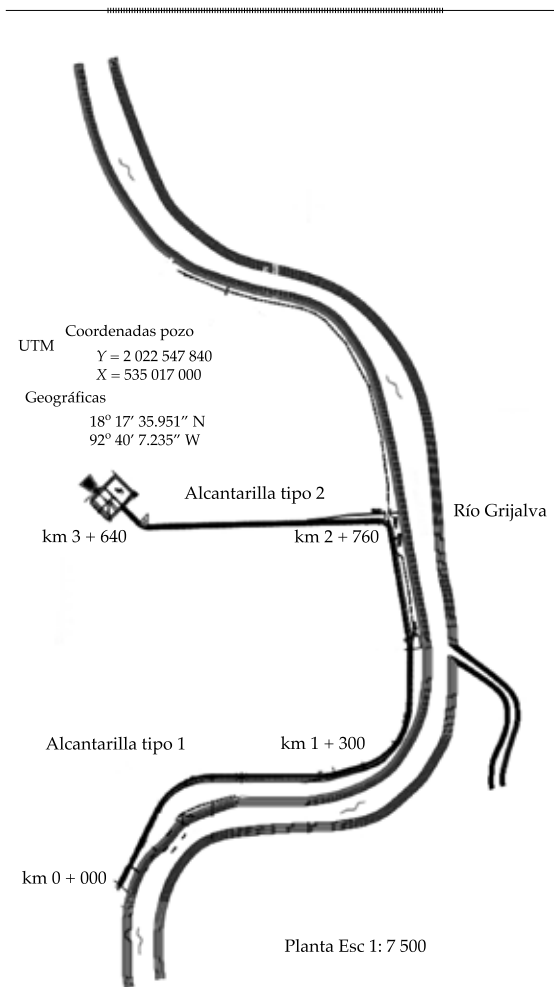


Figura 2. Trazo propuesto de la infraestructura dentro del sistema ambiental.

Se proponen dos escenarios a estudiar en un año: el primero para la época de secas y el segundo para la de lluvias (Yin, Yu, Zhane, Wang, & Xu, 2013). Los datos para cada escenario se presentan en los cuadros 1 y 2.

Con la información obtenida se estiman los gastos del río Grijalva para el año 2014, del cual se proponen usar los gastos para la simulación hidrodinámica en 2D del tránsito de avenidas en las épocas de secas y lluvias, acoplado con un modelo hidrológico (Mani, Chatterjee, & Kumar, 2014; Zhang, Long, Xie, Zhu, & Wang, 2007). En la figura 4 se presentan las descargas del río.

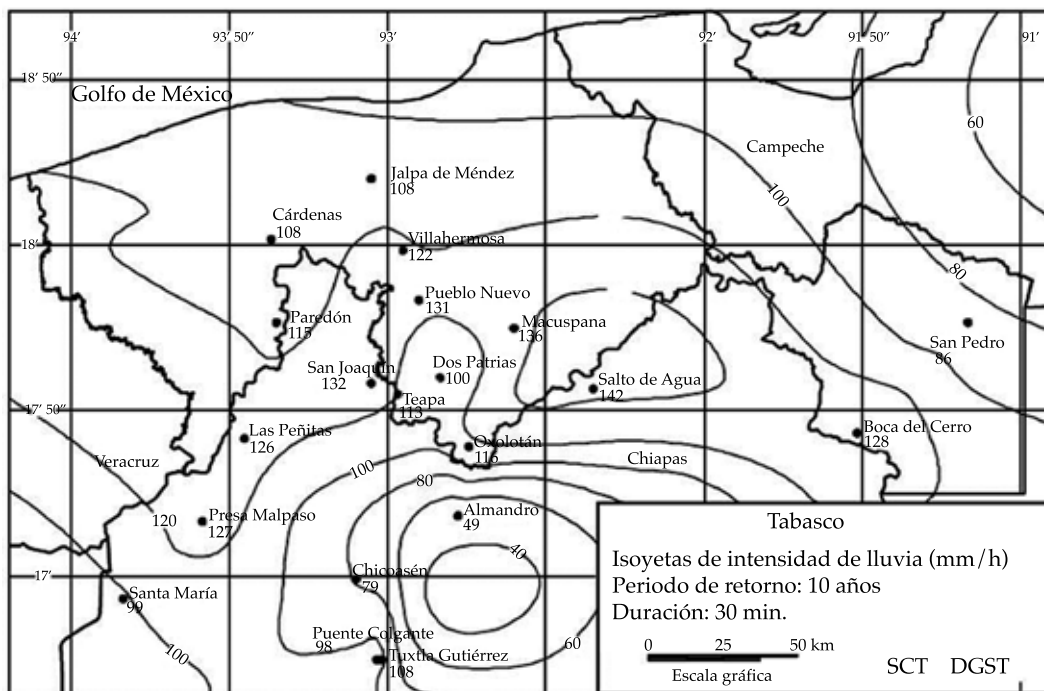


Figura 3a. Isoyetas de intensidad de lluvia para un periodo de retorno de 10 años y duración de 30 minutos.

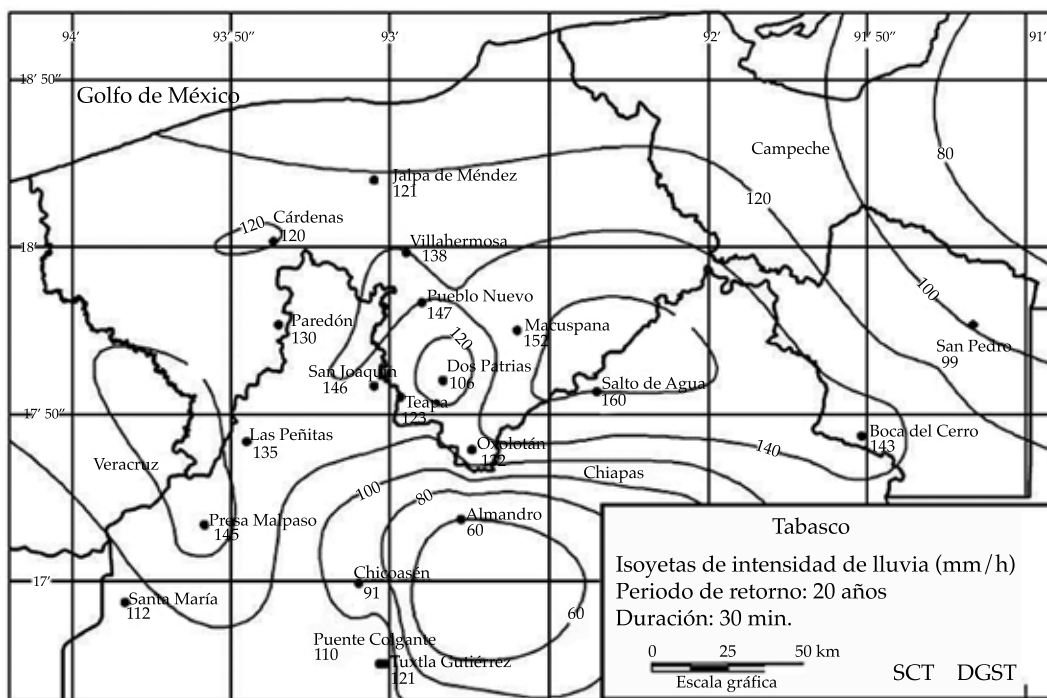


Figura 3b. Isoyetas de intensidad de lluvia para un periodo de retorno de 20 años y duración de 30 minutos.

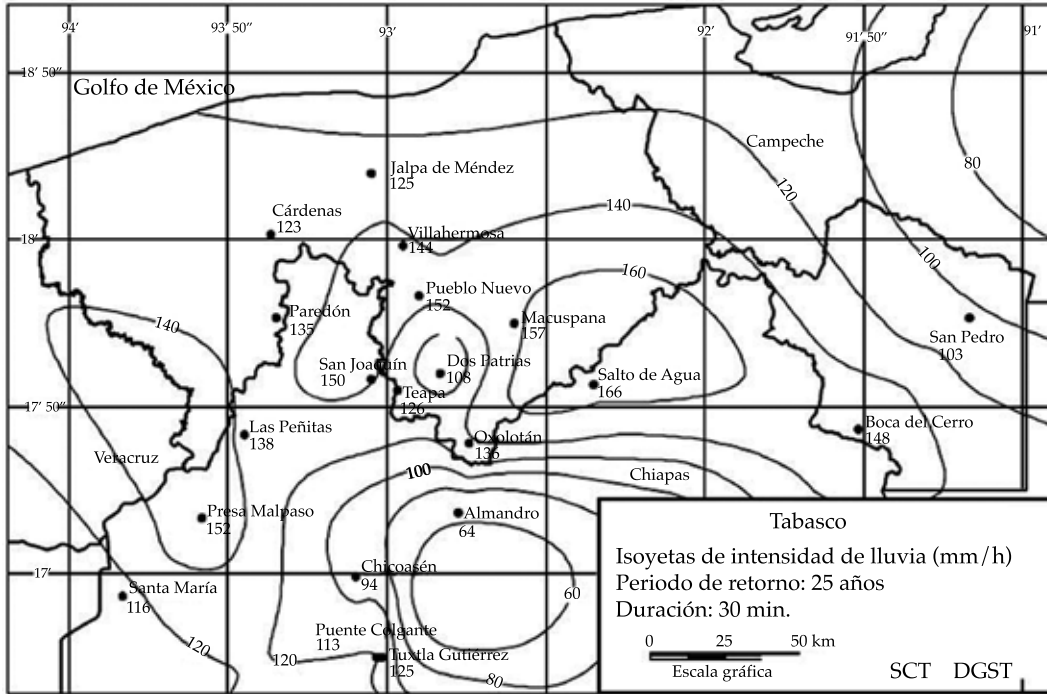


Figura 3c. Isoyetas de intensidad de lluvia para un periodo de retorno de 25 años y duración de 30 minutos.

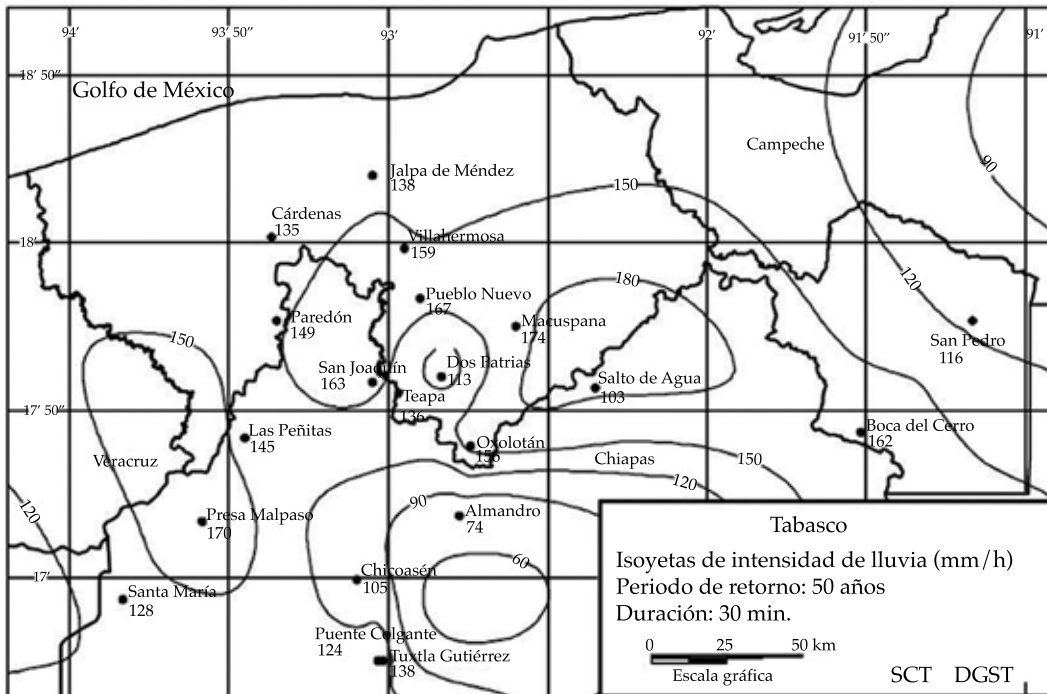


Figura 3d. Isoyetas de intensidad de lluvia para un periodo de retorno de 50 años y duración de 30 minutos.

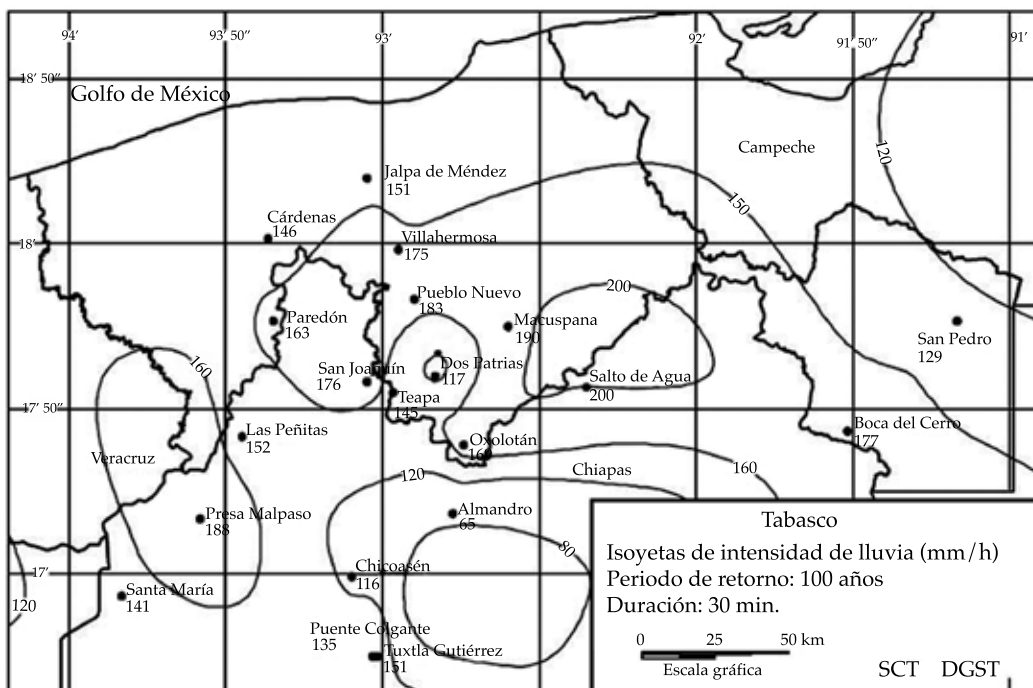


Figura 3e. Isoyetas de intensidad de lluvia para un periodo de retorno de 100 años y duración de 30 minutos.

Cuadro 1. Resumen de valores obtenidos de los datos para alimentar el modelo hidrodinámico para el año 2014.

Época del año	Precipitación media mensual	Temperatura media mensual	Evaporación media mensual
Secas	156.79 mm	26.4 °C	148.66 mm
Lluvias	206.15 mm	26.2 °C	117.33 mm

Cuadro 2. Valores de escurrimiento y permeabilidad en el sistema ambiental.

Época del año	Densidad de vegetación	Permeabilidad del suelo	Coefficiente de escurrimiento en la zona (%)
Secas	Media-baja	Media	De 15 a 25
Lluvias	Media	Media	Mayor que 25

Metodología

El modelo hidrodinámico empleado resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes simplificadas para flujos de superficie libre en coordenadas cartesianas; con la hipótesis de presión hidrostática y considerando los postulados de Reynolds son (Broomans, 2003):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \text{div}(v_e \overline{\text{grad}}(u)), \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \text{div}(v_e \overline{\text{grad}}(v)), \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-z_f}^{\eta} u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-z_f}^{\eta} v dz \right) \end{aligned} \quad (1)$$

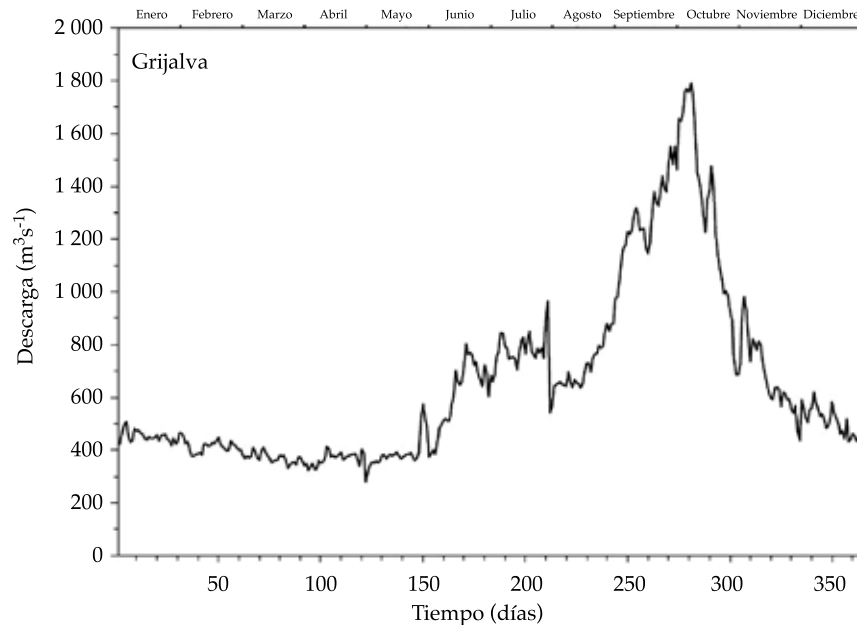


Figura 4. Estimación del gasto del río Grijalva para 365 días del año 2014.

donde v_e es el coeficiente de viscosidad efectiva, obteniéndose mediante la suma del coeficiente de viscosidad turbulenta y molecular $v_e = v_t + v_m$. Stansby (2003) propone el siguiente modelo para resolver la viscosidad turbulenta:

$$v_t = \left\{ \ell_n^4 \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right] + \ell_v^4 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (2)$$

donde la longitud vertical se define por $\ell_v = K(z - z_b)$ para $(z - z_b)/\delta < \lambda/K$ y $\ell_v = \lambda\delta$ para $\lambda/K < (z - z_b)/\delta < 1$. K es la constante de von Karman con valor típico de 0.41; $(z - z_b)$ es la distancia desde el fondo; δ es el espesor de la capa límite, y λ es una constante con valor de 0.09. Las condiciones de frontera para la superficie libre y de fondo se representan por:

$$\begin{aligned} \tau_x^{\text{fondo}} &= v_e \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{\text{fondo}} = \frac{g\sqrt{u^2 + v^2}}{Cz^2} (u), \\ \tau_y^{\text{fondo}} &= v_e \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{\text{fondo}} = \frac{g\sqrt{u^2 + v^2}}{Cz^2} (v) \end{aligned} \quad (3)$$

donde Cz es el coeficiente de fricción de Chezy. Las componentes de la velocidad toman los valores de la capa adyacente a la interface agua-sedimento, definidas como:

$$\begin{aligned} \tau_x^{\text{sup}} &= v_e \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{\text{superficie}} = - \frac{\rho_{\text{aire}}}{\rho_{\text{agua}}} a_{\text{viento}} \quad x \mid x', \\ \tau_y^{\text{sup}} &= v_e \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{\text{superficie}} = - \frac{\rho_{\text{aire}}}{\rho_{\text{agua}}} a_{\text{viento}} \quad y \mid y' \end{aligned} \quad (4)$$

donde $\rho_{\text{aire}} = 1.29 \text{ kg/m}^3$; ω_x y ω_y son las componentes horizontales en x y y , respectivamente, de la velocidad del viento a 10 m de altitud. El coeficiente a_{aire} (adimensional) se puede obtener utilizando la ecuación dada por Flather (1976) (UNESCO, 1981):

$$\begin{aligned} a_{\text{viento}} &= 0.565 \times 10^{-3} \text{ si } |^{-} | \leq 5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ a_{\text{viento}} &= (-0.12 + 0.137 |^{-} |) 10^{-3} \text{ si } 5 \leq |^{-} | \leq 19.22 \text{ m/s} \\ a_{\text{viento}} &= 2.513 \times 10^{-3} \text{ si } |^{-} | \geq 19.22 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (5)$$

La amenaza por inundación está en función de la ocurrencia del fenómeno y de su intensidad (Gurusamy & Jayaraman, 2012). La intensidad, a su vez, se define en función de la velocidad y profundidad del agua, así como de la duración de la inundación. Por lo tanto, la definición de amenaza de inundación, en función del daño potencial (Zhou *et al.*, 2014), toma en cuenta la probabilidad o frecuencia de ocurrencia de la inundación, así como los niveles o altura de la superficie libre del agua.

El modelo hidrológico propuesto tiene como principio la relación precipitación-escorrentía e incorpora la generación de lluvias convectivas estocásticas (Gubarevat, 2011), que permite definir escenarios de amenazas específicos para la posterior evaluación del peligro de inundación asociado. Se emplea la distribución de Gumbel con parámetros estimados con el método de Momentos Ponderados con Probabilidad (MPP), considerado la mejor distribución que se ajusta a precipitaciones extremas para este caso (Jean, Kim, & Kim, 2011):

$$P_m = \frac{\sum [P_i * A]}{\sum [A]} \quad (6)$$

$$I(t, T) = at^b \quad (7)$$

donde P_m es la precipitación media; A es el área limitada por las poligonales de Thiessen o curvas de isoyetas; P_i es la precipitación medida en estación climatológica "i" o precipitación promedio entre dos curvas isoyetas; I es la intensidad de lluvia en mm/h. El inverso del periodo de retorno es la probabilidad de ocurrencia, es decir, la probabilidad de que se presente la intensidad de tormenta en un año.

Los parámetros a , b , m , n son función de las características meteorológica de la zona. El hietograma acumulado está descrito como:

$$H(t) = I(t, T) * t = at^b \quad (8)$$

y la intensidad instantánea asociada como:

$$I(t) = \frac{dH(t)}{dt} = (b+1)at^{b-1} \quad (9)$$

Para completar la información faltante de registros pluviométricos, se emplea el del National Weather Service (Patro, Chaterjee, Mohanty, Singh, & Raghuwanshi, 2009), basado en la siguiente correlación:

$$P = \frac{\sum [P_i / r_i^2]}{\sum [1 / r_i^2]} \quad (10)$$

donde P es la precipitación que se extrapola; P_i las precipitaciones de las estaciones existentes en el entorno de la que desconocemos, y r_i es las distancias desde esta estación a las estaciones próximas.

Greenwood, Landwehr, Matalas y Wallis (1979) introdujeron el método MPP como un procedimiento de estimación robusto, alternativo a los métodos de momentos y máxima verosimilitud. La estimación de parámetros por el MPP (Caeiro, Gomes, & Vandewalle, 2014) comienza con los momentos $M_{l,j,k}$.

$$M_{l,j,k} = E \left[X^l F^j (1-F)^k \right] \quad (11)$$

Siendo j y k enteros no negativos, el momento ponderado con probabilidad de orden (l, j, k) es proporcional al i -ésimo momento con respecto al origen de la estadística de orden $(j+1)$ para una muestra de tamaño $n = k + j + 1$.

La función de distribución de Gumbel está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{a} \exp \left\{ -\left(\frac{x-m}{a} \right) - \exp \left[-\left(\frac{x-m}{a} \right) \right] \right\} \quad (12)$$

donde a y m son los parámetros de la distribución, y x es la magnitud del evento extremo.

De acuerdo con Greenwood *et al.* (1979), la expresión para la magnitud de la variable con un periodo de retorno T , según esta distribución es:

$$X_T = m - a \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (13)$$

donde:

$$m = M_0 - \epsilon a \quad (14)$$

$$a = \frac{M_0 - 2M_1}{\ln(2)} \quad (15)$$

Para $\epsilon = 0.5772$ y $M_k = M_{L_0,k}$ para k entero no negativo se estima como:

$$M_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \frac{\binom{n-i}{k}}{\binom{n-1}{k}} \quad (16)$$

Siendo n el número de datos históricos y x_i el valor del dato i , ordenados de mayor a menor. Operando la expresión para M_k se tiene:

$$M_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (17)$$

$$M_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \frac{n-i}{n-1} \quad (18)$$

con base en lo cual se determinan los valores de a y m con las ecuaciones (14) y (15).

Generación de mallas numéricas

Se elaboraron las mallas rectangulares con batimetría interpolada de la zona de estudio,

con espaciamiento en ambas direcciones de 20 metros (figura 5).

Resultados de la simulación

Detallando las etapas de simulación, éstas consisten principalmente en la modelación de dos escenarios en el año: la época de secas y la de lluvias; se escogen estas temporadas considerando que son las más representativas en el año. Las condiciones iniciales para cada temporada se expresan en el cuadro 3.

Simulación del sistema ambiental en condiciones actuales (antes del proyecto)

Los resultados de la simulación de la hidrodinámica superficial de los escenarios de secas con alturas de precipitación fue de 45, 80, 120 y 156 mm, y de lluvias con alturas de 160, 185, 197, 206 mm en la totalidad del sistema ambiental; las duraciones de lluvia fueron hasta de 2.5 horas continuas según registros. En la figura 6 se muestran las zonas potencialmente inundables.

Se puede observar que las zonas potencialmente inundables para una altura de precipitación de 45 mm presentan un porcentaje de inundación de 8% del total de la zona de estudio, mientras que para una altura de 206 mm, se obtiene un porcentaje de área inundada de 86%.

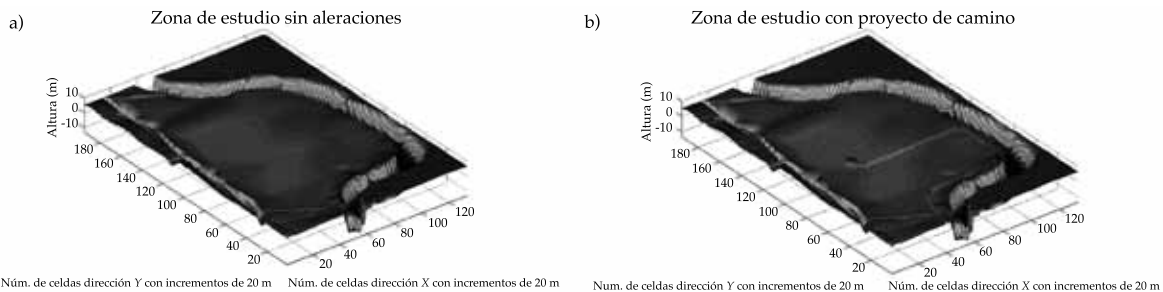


Figura 5. Malla numérica de la zona de estudio (izquierda, estado natural; derecha, con camino proyectado).

Cuadro 3. Resumen de condiciones iniciales y forzantes para la modelación en las diferentes etapas y escenarios propuestos.

Etapa	Temporada	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Evaporación (mm)	Escurrimiento (adimensional)
Condición actual y c/proyecto	Secas	De 45 a 156	26.4	148.66	0.020
	Lluvias	De 160 a 206	26.2	117.33	0.037

Etapa	Temporada	Permeabilidad (%)	Densidad de vegetación	Gasto Grijalva (m ³ /s)	Velocidad viento laguna (m/s)
Condición actual y c/proyecto	Secas	30.00	Media-baja	320 mín 1 070 med	NE 4.1
	Lluvias	20.00	Media	1 900 máx 3 050 máx hist	E 7.3

Simulación del sistema ambiental con obras de proyecto

Para esta simulación se contempla la construcción de un camino, considerando obras como alcantarillas y puentes, y/o pasos de agua; estas obras fueron ya propuestas y ubicadas de manera estratégica. Los siguientes resultados muestran el comportamiento del camino con las alcantarillas y, en especial, de la zona de inundación, donde se observa que el funcionamiento hidrológico del sistema ambiental no se ha alterado con estas medidas de mitigación.

De los resultados de las zonas de inundación para los escenarios de intensidad de precipitación descritos en la figura 7, se aprecia que el nivel de la superficie libre originada por lluvia y por el desbordamiento del río Tabasquillo no afectó el camino ni lo tapó.

Para el escenario antes de proyecto, se observan las mismas zonas inundadas, así como algunas zonas con acumulación o represamiento de agua. El porcentaje de zona inundable con el camino es de un 89%; es decir, 3% más que en condiciones normales antes de proyecto.

Análisis hidrodinámico de las medidas de mitigación (alcantarillas y pasos)

El camino, al ser nuevo, requiere de drenes o alcantarillas, para permitir el libre paso del flujo hidrológico en la zona de estudio. La propuesta establecida por el proyecto en

cuanto al número, dimensiones aproximadas y ubicación de estas obras a lo largo del camino (figura 2) se resume a continuación:

Se simuló el comportamiento hidráulico para los dos tipos de las alcantarillas descritas en el cuadro 4 bajo las condiciones de alturas de precipitación de 45, 80, 120, 156, 160, 185, 197 y 206 mm; en la figura 8 se muestran los resultados para la simulación de 206 mm para la alcantarilla tipo 2 (1.05 x 1.05 m), considerando ser la situación más desfavorable y la que presenta mayor interés por las posibles magnitudes de velocidad que alcanza en la sección de la alcantarilla. La simulación del flujo a través de la obra de paso tiene como objetivo revisar los siguientes criterios:

- El área hidráulica debe garantizar el funcionamiento hidráulico para las intensidades de lluvia más críticas, según registros y tiempos de retorno del sistema ambiental.
- La densidad de la vegetación del sitio para cada alcantarilla será diseñada dando un cierto porcentaje por crecimiento de la vegetación (obstrucción del área hidráulica de un 65 a un 70%), por lo que se propone de un 15 a 20% más del área de diseño.

El comportamiento hidráulico de la sección de la alcantarilla reporta velocidad promedio de 0.05 m/s, suficiente para permitir el paso del flujo, considerando un área hidráulica

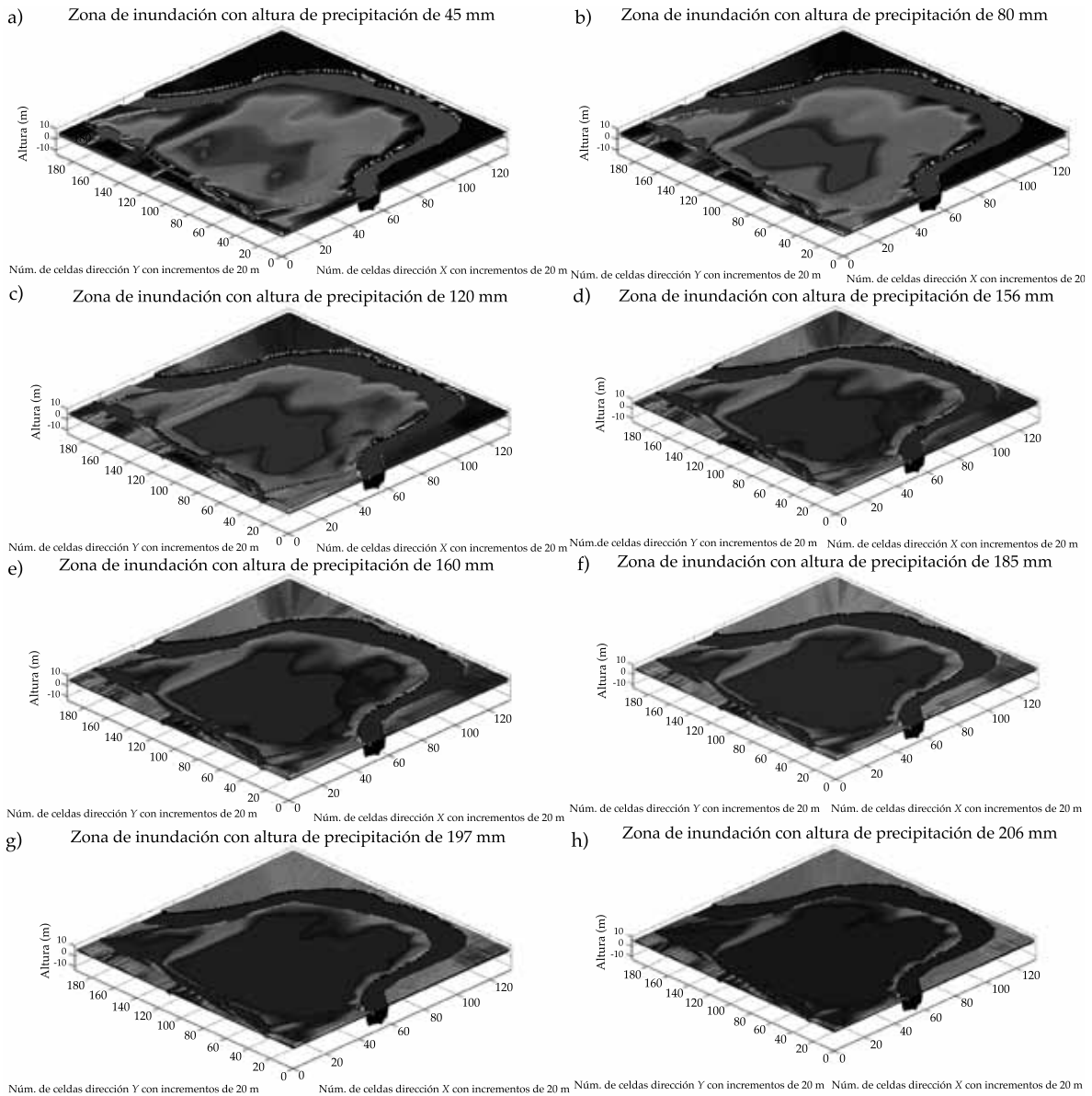


Figura 6. Zonas potencialmente inundables antes de proyecto.

efectiva de 35%; esto es, el área restante que es obstruida se atribuye a la influencia de la vegetación que llega a cubrir la sección de dicha alcantarilla; esta condición se implementa en la simulación, considerando obstáculos en la sección que asemejen la condición de la vegetación.

El valor de la amplitud de inundación entre la precipitación mínima y la máxima es de

1.60 metros, el valor con el que se modeló la diferencia de niveles de superficie en los dos tipos de alcantarillas (de 0.91 y 1.05 m). Con estos resultados se estima que la magnitud de la velocidad es suficiente para generar circulación en la zona de inundación y brindar en menor cantidad alteraciones a la zona de estudio, propiciando condiciones similares a las originales antes del proyecto.

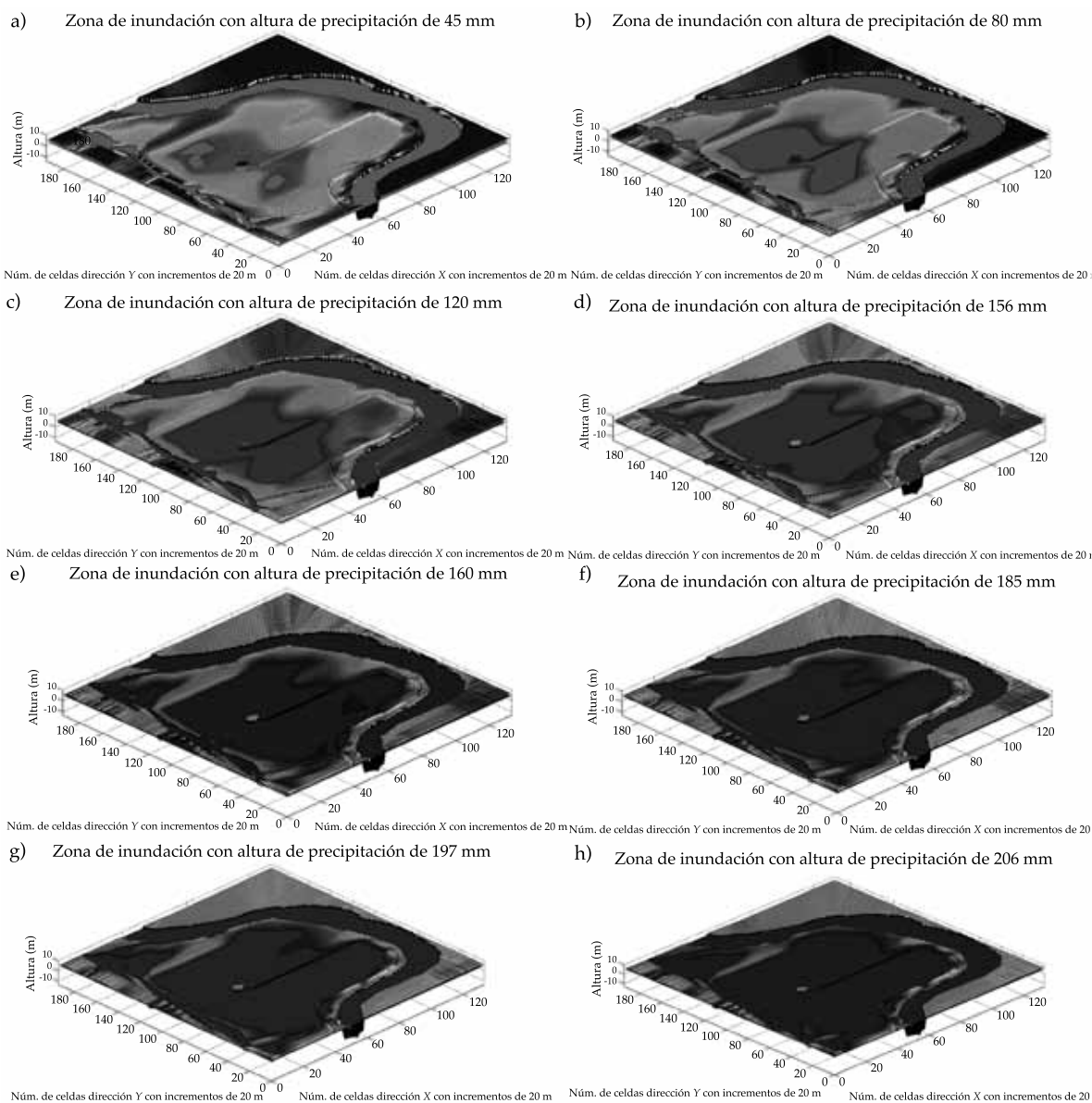


Figura 7. Zonas potencialmente inundables, incluyendo el camino.

Cuadro 4. Ubicación y dimensiones de las alcantarillas en el camino proyectado.

Kilometraje de ubicación	Número de alcantarillas	Dimensiones de alcantarilla (m)
0+000 al 1+300	5	0.91 x 0.91 (tipo 1)
2+760 al 3+640	4	1.05 x 1.05 (tipo 2)

Conclusiones

Los resultados muestran que el río Grijalva no presenta una influencia superficial evidente;

esto se debe a que en la margen izquierda del río, que es donde se encuentra la zona de estudio, se localiza un bordo que protege de alguna forma la crecida del río, con una

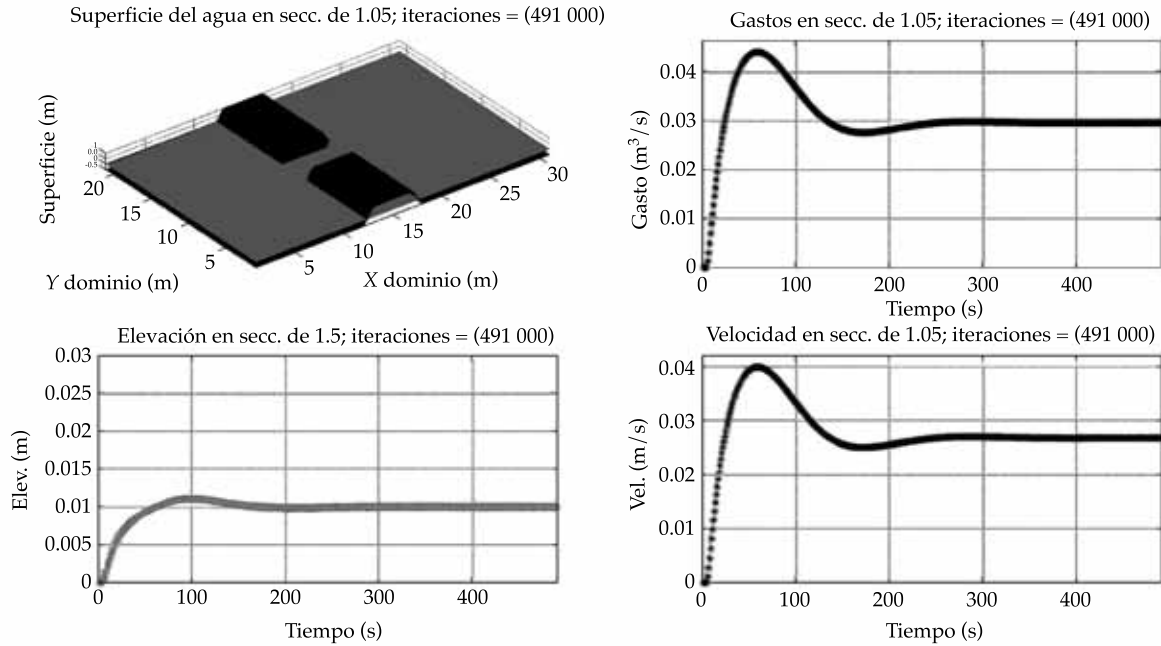


Figura 8. Comportamiento hidráulico de una alcantarilla de 1.05 x 1.05 m, con altura de precipitación de 206 mm.

altura aproximada de 3.7 metros, y por lo tanto minimiza el riesgo de inundación. Sin embargo, el río Grijalva tiene una influencia sobre los canales superior e inferior, que con ayuda del río Tabasquillo permiten inundar la zona de estudio. Las zonas potencialmente inundables se consideraron de 0.5 a 3.5 metros de elevación, que ocupan un aproximado de 80% del sistema ambiental; en estas zonas se proyecta localizar la infraestructura del pozo.

En cuanto a la posible ubicación del pozo, éste se localiza en una zona baja, propicia a la colección de escurrimientos, donde la velocidad del flujo que se reporta en la modelación que pasa por las alcantarillas del camino alcanza magnitudes de hasta 0.08 m/s bajo condiciones de lluvias (intensidad de precipitación promedio mensual de 120 mm/h, con periodo de retorno de 100 años y duración de 30 min), por lo que la obra del camino y la pera no alteran sustancialmente la intensidad del flujo; en lo que se refiere a la dirección, al ser esta zona un bajo, la dirección no se modifica debido a que todo se concentra en el centro.

El aspecto hidrológico primordial que se debe mantener es el paso del flujo superficial; las alcantarillas permiten este funcionamiento y sólo se debe vigilar que la vegetación no llegue a cubrir más de un 65% del área hidráulica propuesta; este criterio se plantea observando las condiciones actuales donde se ubicarán las alcantarillas en el camino.

Referencias

- Broomans, P. (2003). *Numerical Accuracy in Solutions of the Shallow-Water Equations* (120 pp.). Master Thesis. Delf: TU Delf & WL, Delf Hydraulics.
- Caeiro, F., Gomes, M. I., & Vandewalle, B. (March, 2014). Semi-Parametric Probability-Weighted Moments Estimation Revisited. *Methodology and Computing in Applied Probability Springer-Verlag*, 16(1), 1-29.
- Greenwood, J. A., Landwehr, J. M., Matalas, N. C., & Wallis, J. R. (1979). Definition and Relation to Parameters of Several Distribution Expressible In Inverse Form. *Water Resources Research*, 15(5), 1049-1054.
- Gubarevat, S. (December, 2011). Types of Probability Distributions in the Evaluation of Extreme Floods. *Water Resources Springer-Verlag*, 38(7), 962-971.

- Gurusamy, S., & Jayaraman, G. (December, 2012). Flood Inundation Simulation in River Basin Using a Shallow Water Model: Application to River Yamuna, Delhi region. *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics Springer-Verlag*, 4(4), 250-259.
- Jean, J. J., Kim, Y. O., & Kim, Y. (August, 2011). Expected probability Weighted Moment Estimator for Censored Flood Data. *Advances in Water Resources, Elsevier Sci. Ltd.*, 34(8), 933-945.
- Mani, P., Chatterjee, C., & Kumar, R. (January, 2014). Flood Hazard Assessment with Multiparameter Approach Derived from Coupled 1D and 2D Hydrodynamic Flow Model. *Natural Hazards Springer*, 70(2), 1553-1574.
- Patro, S., Chatterjee, C., Mohanty, S., Singh, R., & Raghuvanshi, N. S. (March, 2009). Flood Inundation Modeling Using Mike Flood and Remote Sensing Data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing Springer*, 37(1), 107-118.
- Stansby, P. (2003). A Mixing-Length Model for Shallow Turbulent Wakes. *Journal of Fluid Mechanics*, 495, 369-384. SCT-DGST (2013). *Cartas de isoyetas para el año 2013*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Dirección Regional de Tabasco, México. Recuperado de <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/isoyetas/>.
- UNESCO (1981). Background Papers and Supporting Data on the International Equation of State of Seawater 1980. *UNESCO Technical Papers in Marine Science*, 38, 192.
- Yin, J., Yu, D., Zhane, Y., Wang, J., & Xu, S. (March, 2013). Multiple Scenario Analyses of Huangpu River Flooding Using a 1D/2D Coupled Flood Inundation Model. *Natural Hazards Springer*, 66(2), 577-589.
- Zhang, X., Long, W., Xie, H., Zhu, J., & Wang, J. (February, 2007). Numerical Simulation of Flood Inundation Processes by 2D Shallow Water Equations. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China Springer*, 1(1), 107.
- Zhou, Z., Wang, X., Sun, R., Ao, X., Sun, X., & Song, M. (January, 2014). Study of the Comprehensive Risk Analysis of Dam-Break Flooding Based on the Numerical Simulation of Flood Routing. Part II: Model Application and Results. *Natural Hazards Springer*, 72(2), 675-700.

Dirección institucional de los autores

Dr. Israel E. Herrera-Díaz
Dr. José R. Gasca-Tirado

Universidad de Guanajuato
Depto. de Ingeniería Agroindustrial
Campus Celaya-Salvatierra, México
Av. Ing. Javier Barrios Sierra núm 201
Esq. Av. Baja California
38110 Ejido de Sta. María del Refugio, Celaya, Gto. MÉXICO
Teléfono: +52 (461) 5985 922, extensiones 1627 y 1628
eherrera@ugto.mx
jrgasca@ugto.mx

Dr. Clemente Rodríguez-Cuevas

Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Av. Manuel Nava núm. 8, Zona Universitaria
78290 San Luis Potosí, San Luis Potosí, MÉXICO
Teléfono: +52 (444) 8262 330, extensión 2102
clemente.rodriguez@uaslp.mx

Dr. Carlos Couder-Castañeda

Instituto Politécnico Nacional
Centro de Desarrollo Aeroespacial
Belisario Domínguez núm. 22
06010 México, D.F., MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 3436 3341
ccouder@ipn.mx