

DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-02

Artículos

Peligro por inundación durante el huracán Stan en la cuenca del río Vicente Guerrero, Siltepec, Chiapas, México

Danger from flooding during Hurricane Stan in the Vicente Guerrero River basin, Siltepec, Chiapas, Mexico

Rodrigo Roblero-Hidalgo¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6361-8084>

Jesús Chávez-Morales², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2894-5853>

Laura Alicia Ibáñez-Castillo³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9287-655X>

Oscar L. Palacios-Vélez⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7907-2802>

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México,
rodrigo_roblero@tlaloc.imta.mx

²Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Montecillo, Texcoco,
Estado de México, México, chavezje@colpos.mx

³Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Texcoco, Estado de México, México, libacas@gmail.com

⁴Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, opalacio@colpos.mx

Autor para correspondencia: Rodrigo Roblero-Hidalgo, rodrigo_roblero@tlaloc.imta.mx

Resumen

El huracán Stan afectó social, económica, hidrológica e hidráulicamente la cuenca del río Vicente Guerrero, Siltepec, Chiapas, México, del 3 al 6 de octubre de 2005, registrándose en la zona precipitaciones máximas de 552 mm/día el día 5 de octubre de 2005. Mediante modelación hidrológica, con el modelo HEC-HMS, se obtuvo un gasto pico de 460.1 m³/s, a la salida de la cuenca y los hidrogramas a la salida en cada subcuenca. Esos datos se utilizaron en la modelación hidráulica, con el modelo IBER, que reportó niveles máximos en el cauce de 5.75 m y velocidades máximas de 11.38 m/s. Se generaron anchos de bandas de inundación de 100 m en ambas márgenes. Los resultados se validaron con la información de una imagen satelital de Bing Maps de diciembre 2005, que muestra la banda de paso del huracán, comparando las coordenadas, X, Y, Z del evento simulado contra el observado, alcanzando un $r^2 = 0.99$ para cada margen. Con esta información se generó un “mapa de peligrosidad”, de acuerdo con la Norma ACA de IBER, resultando que

más de un 80 % del área de la envolvente de inundación presenta peligrosidad "elevada".

Palabras clave: cuenca, modelo hidrológico, modelo hidráulico, peligrosidad.

Abstract

Hurricane Stan (October 3 to 6, 2005) affected the Vicente Guerrero River basin, Siltepec, Chiapas, Mexico, socially, economically, hydrologically, and hydraulically. On October 5, 2005, the maximum precipitation of 552 mm/day fell. Through hydrological modeling, with the HEC-HMS model, a peak flow of 460.1 m³/s at the outlet of the basin and the hydrographs at the exit in each sub-basin were obtained. These data were used in hydraulic modeling with the IBER model, which reported maximum levels of 5.75 m and maximum speeds of 11.38 m/s in the channel. Flood bandwidths of 100 m were generated on both banks. The results were validated with the information of a Bing Maps satellite image of December 2005, observed at the passage of the hurricane, comparing the coordinates, X, Y, and Z, of the simulated event against the observed event, achieving $r^2 = 0.99$ for each margin. With this information, a "hazard map" was generated, by IBER's ACA Standard, which showed that more than 80 % of the area of the flood envelope is in very high danger.

Keywords: Basin, hydrological model, hydraulic model, hazard risk.

Recibido: 23/05/2019

Aceptado: 10/02/2021

Introducción

La inundación es el proceso que se produce cuando el caudal que se genera por la precipitación en una cuenca hidrológica supera la capacidad de los cauces en los ríos para conducirlo y éstos se desbordan. Los excesos de agua pueden cubrir las partes bajas provocando inundaciones, afectando a poblaciones y zonas aledañas. Las inundaciones pueden ser provocadas por el exceso de precipitación, ciclones tropicales, falla de obras hidráulicas y por las actividades humanas (Cenapred, 2001).

Se calcula que en el siglo XX fallecieron 32 millones de personas debido a inundaciones (Cenapred, 2001). En el mundo, en el periodo de 1981-2000 y 2001-2010, los costos asociados con estos eventos se incrementaron en un 200 %. Además, con el crecimiento de la población en el orbe también aumentó el número de personas que en promedio están anualmente expuestas a inundaciones debido a que los nuevos asentamientos se ubican en llanuras inundables. De 1970 a 2010 la población expuesta a las consecuencias de una inundación creció de 33.3

a 70.4 millones de personas (Mejía-Estrada, Rodríguez-Rincón, & Pedrozo-Acuña, 2015).

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (Conagua), fueron ocho los huracanes que impactaron directamente a México durante el 2005: Bret, Cindy, Dora, Emily, Gert, José, Stan y Wilma (Cenapred, 2005).

El 1° de octubre de 2005 se generó la depresión tropical número 20, que pasó de depresión tropical a la tormenta tropical Stan, con vientos máximos sostenidos de 75 km/h y rachas de 90 km/h.

El día 2 cruzó la península de Yucatán con trayectoria hacia el oeste-noroeste; al avanzar sobre tierra empezó a perder fuerza, por lo que al final del día se encontraba a 10 km al sureste de la población de Celestún, Yucatán, como depresión tropical, con vientos máximos sostenidos de 55 km/h.

El día 3 la depresión tropical salió al Golfo de México y a las 4:00 horas ya se encontraba nuevamente como tormenta tropical, con vientos máximos sostenidos de 65 km/h y rachas de 85 km/h. Durante el resto de este día mantuvo su desplazamiento hacia el oeste, cruzando la parte suroeste del Golfo de México.

El día 4, cuando se encontraba a 75 km al norte de Coatzacoalcos, Veracruz, el avión cazahuracanes reportó que la tormenta tropical se había intensificado a huracán de categoría I, con vientos máximos sostenidos de 130 km/h y rachas de 155 km/h. El huracán siguió su trayectoria con rumbo hacia la costa de Veracruz, y poco antes de las

10:00 horas local tocó tierra entre Punta Roca Partida y Monte Pío, Veracruz, a unos 20 km al noreste de San Andrés Tuxtla, Veracruz, con vientos máximos sostenidos de 130 km/h. Al tocar tierra empezó a perder fuerza y así, unas horas más tarde, cuando se encontraba a 25 km al este-sureste de Villa Azueta, Veracruz, se degradó a tormenta tropical, con vientos máximos sostenidos de 105 km/h y rachas de 130 km/h. Al cruzar la sierra norte de Oaxaca la tormenta tropical se debilitó a depresión tropical, a una distancia de 30 km al noreste de la ciudad de Oaxaca, presentando vientos máximos sostenidos de 55 km/h y rachas de 75 km/h.

Finalmente, el día 5, después de haber avanzado sobre la región montañosa del estado de Oaxaca, la depresión tropical entró en proceso de disipación, a una distancia de 60 km al oeste-suroeste de la ciudad de Oaxaca.

Durante el recorrido del huracán Stan, las bandas nubosas dieron lugar a lluvias intensas que afectaron con inundaciones, deslaves y daños materiales a los estados de Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, Yucatán, Campeche y Tabasco (Hernández-Unzón & Bravo, 2005).

Con registros de precipitación en Guatemala —del 1° al 10 de octubre de 2005— de 868.2 mm en la zona de la ciudad de Tecún Umán, alcanzó el valor extremo en 24 h de 265.2 mm para el 4 de octubre (Dardón & Morales, 2006).

En la zona de Tapachula se reportó que el 4 de octubre de 2005 hubo 2 000 casas desaparecidas, cerca de 100 000 personas

damnificadas, cuatro puentes y la vía del ferrocarril destruidos. Desde el 1º hasta el 3 de octubre, la precipitación en la zona montañosa cercana al complejo volcánico Tacaná fue de 143 mm, mientras que el día 4 fue de 242 mm (Murcia & Macías, 2009).

Las pérdidas económicas durante 2005 se estiman superiores a 1 500 millones de pesos para el sector infraestructura de la vivienda en Chiapas. A nivel nacional se estimó un valor monetario de pérdidas por más de 45.4 miles de millones de pesos (Cenapred, 2005).

Debido al efecto destructivo de la temporada de huracanes en Chiapas, el poder ejecutivo solicitó el 26 de septiembre de 2005 a la Federación la declaratoria de emergencia para los 12 primeros municipios afectados por las intensas lluvias ocurridas los días 24 y 25 de septiembre; para las registradas del 3 al 6 de octubre se solicitó la ampliación de la declaratoria de emergencia para 29 municipios más, sumando un total de 41 municipios, declarada en el boletín número 250 de la Coordinación General de Protección Civil; se procedió a instalar el Comité de Evaluación de Daños el 12 de octubre (Hacienda del Estado de Chiapas, 2005), y se declaró en emergencia a los municipios de Tonalá, Arriaga, Suchiate, Metapa de Domínguez, Unión Juárez, Frontera Hidalgo, Cacahoatán, Tuxtla Chico, El Porvenir, Siltepec, Mazapa de Madero, Bella Vista, Benemérito de las Américas, La Grandeza, Bejucal de Ocampo, Amatenango de la Frontera, Frontera Comalapa, La Concordia, Ángel Albino Corzo, Villa Corzo, Villaflores, Suchiapa, Chiapa de Corzo, Montecristo de Guerrero, La Libertad, Catazajá, Chicomuselo, Cintalapa y San Cristóbal de las casas en el del estado de Chiapas (DOF, 2005).

Finalmente se estableció la Comisión Especial de Reconstrucción para las Conas Afectadas por Stan (Sabines-Guerrero, 2006).

Muchas personas perecieron, otras perdieron todos sus bienes y otras quedaron incomunicadas por días (Reyes-Hernández, 2006).

El huracán Stan dejó una lección en cuanto al riesgo provocado por inundaciones. Desde entonces se busca trabajar con la comunidad y sus instituciones, así como iniciar procesos de prevención y mitigación de daños con base en la comunicación eficaz y permanente ante futuras amenazas; por ello se propone un programa hacia la gestión del riesgo, encaminado a proporcionar información y estrategias psicopedagógicas participativas (Álvarez-Gordillo, Álvarez-Gordillo, Eroza-Solana, & Dorantes-Jiménez, 2008).

El huracán trajo consigo un desplazamiento interno de personas de la entidad tanto por la pérdida de bienes como por la reubicación en lugares circunvecinos. Al realizarla reubicación se modificaron los medios de vida existentes. En consecuencia, las actuales condiciones han propiciado una migración (Martínez-Velasco, Lopez-Ochoa, Álvarez-Gordillo, & Schmook, 2016).

Como parte de las acciones de la mitigación contra inundaciones se definen dos grandes grupos: 1) medidas estructurales, cuyo objetivo es evitar o mitigar los daños provocados por una inundación mediante la construcción de obras (regulación, rectificación y protección) (Martín-Vide, 2013); y 2) medidas no estructurales, que corresponden a acciones complementarias para mitigar los efectos de inundaciones basado en

acciones de no obra sino en acciones indirectas e institucionales (Salas, 1999).

Dentro de las acciones institucionales y durante la temporada de lluvia, ante la presencia de un fenómeno hidrometeorológico capaz de generar una inundación, se llevan a cabo medidas cuya finalidad es conocer su evolución durante sus diferentes fases: ocurrencia y cuantificación de la precipitación, transformación en escurrimiento superficial, regulación a lo largo del cauce, desfaseamiento en el tiempo, y atenuación del gasto máximo y operación de la infraestructura hidráulica. Sin embargo, uno de los problemas más recurrentes en el monitoreo de las cuencas es disponer de la información básica que se requiere para el desarrollo de estudios hidrológicos (Godínez-Acosta, 1990).

La hidrología ha utilizado métodos tradicionales para pronosticar niveles de inundación (Agudelo-Otálora, Moscoso-Barrera, Paipa-Galeano, & Mesa-Sciarrotta, 2018). Es por ello que la hidrología de avenidas es un tema que ha cobrado mucha relevancia debido al estudio de inundaciones (Aldama, 2000). El uso de modelos en cuencas hidrológicas es un tema que va en aumento, como lo señala Singh (1995). Varios autores han propuesto metodologías para realizar estudios hidrológicos, con el afán de sistematizarlos (Campos-Aranda, 1991; Campos-Aranda, 1994), todas basadas en el concepto de cuenca, definida como la unidad territorial de gestión donde los grupos sociales tienen diferentes costumbres, reglas de acceso y control sobre los recursos hídricos a través de instituciones formales y no formales. De esta forma, en la cuenca ocurren procesos naturales y sociales a diferentes escalas:

local, comunitaria, microrregional, regional, estatal, nacional y global (Arellano-Monterrosas, 2012).

Los modelos hidrológicos son representaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales, a partir de los cuales se estudia la relación precipitación-escorrentía en una cuenca, a través de datos de entrada y salida; además, permite la simulación del comportamiento hidrológico de los procesos físicos dentro de la misma (Oropeza, 1999).

Vargas-Castañeda, Ibáñez-Castillo y Arteaga-Ramírez (2015) presentan una serie de modelos hidrológicos enfocados en el estudio de la relación lluvia-escorrentía. En la actualidad existen una serie de modelos hidrológicos desarrollados para diferentes condiciones, lugares y situaciones específicas (CDM, 2001). En el caso particular de México, se han aplicado los modelos lluvia-escorrentía SWAT y HEC-HMS (Vargas-Castañeda *et al.*, 2015). Sin embargo es necesario diferenciar los modelos hidrológicos para cuencas, que se enfocan a la determinación de los hidrogramas de escorrentía y los modelos hidráulicos, que estudian en detalle las características del flujo en tramos específicos de los cauces, como los analizados por Singh (1995), Texas A&M (2015) e IBER (2014).

Entre las aplicaciones en modelación se pueden mencionar las siguientes: modelación hidrológica continua para fines de pronóstico de avenidas en ríos (Pérez-Luna, 2015); análisis de cambio de uso de suelo de 1990 a 2005, en donde se refleja un buen estado de conservación en la cuenca del río Huehuetán, localizado en la costa de Chiapas (Juárez-Méndez, Ibáñez-Castillo, Pérez-Nieto, & Arellano-Monterrosas, 2009);

evaluación de la erosión hídrica provocada por las lluvias extremas del huracán Stan en octubre de 2005 en las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, localizadas en Chiapas (Pérez-Nieto, Arellano-Monterrosas, Ibáñez-Castillo, & Hernández-Saucedo, 2012; Pérez-Nieto, 2013); aplicación del método del “número de curva” (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) en tres microcuencas dentro de la cuenca del río Coatán, en Chiapas, para varios eventos de lluvia ocurridos durante 2011, obteniendo los números de curva (CN) de 69 para Vega de los Gatos, 55 Progreso y 72 Chanjalé (Ibáñez-Castillo, Alonso-Sánchez, Arteaga-Ramírez, & Vázquez-Peña, 2014); determinación de niveles y caudales en los ríos de Amacuzac y San Gerónimo mediante dos modelos hidrológicos determinísticos (Ba, Díaz-Delgado, & Rodríguez-Osorio, 2001); aplicación del modelo de simulación hidráulica HEC-RAS para delimitar las zonas con riesgo a inundación en la subcuenca del río La Antigua, Veracruz, que considera la vulnerabilidad y el peligro de un sistema ante la ocurrencia de un fenómeno extremo perturbador (Larios-Tlali, Torres-Benites, Quevedo-Nolasco, Martínez-Menes, & Salgado-Tránsito, 2015). En otro estudio se estimó la tormenta de diseño para periodos de retorno en la región semiárida de la subcuenca del Río Nuevo, a fin de determinar las áreas de inundación del cauce principal mediante un modelo integrado, que consiste en desarrollar un acoplamiento de los modelos hidrológico e hidráulico para diferentes periodos de retorno, alimentados con un Análisis Regional de Frecuencia (ARF) (Salazar-Briones *et al.*, 2018). En otro estudio se realizó la simulación del escurrimiento en el río Yautepec, Morelos, donde se delimitaron zonas de

inundación de este río para diferentes periodos de retorno (Zúñiga-Malpica, 2010). Finalmente se puede mencionar el uso del modelo hidrológico MIKE-SHE para simular procesos de escorrentía de agua de la cuenca hidrológica del río Teapa en el sureste de México (Torres, Nikolskii, Martínez-Miranda, & Martínez, 2018).

Con base en lo revisado, el objetivo del estudio es cuantificar el peligro por inundación provocado por el huracán Stan en la cuenca del río Vicente Guerrero, Siltepec, Chiapas, México.

Materiales y métodos

A continuación se presentan la ubicación del área de estudio, las características del modelo de elevaciones topográficas, la capa de uso de suelo y vegetación, la capa edafológica, la información de precipitación diaria, y las principales características del modelo hidrológico e hidráulico utilizado.

Zona de estudio

La investigación se realizó en la cuenca del río Vicente Guerrero, en el municipio de Siltepec, Chiapas, México, con un área de 208.5 km², que se localiza en la región hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta, en las coordenadas: 15° 38' 6.21" a 15° 26' 50.27" latitud norte y -92° 26' 48.6" a -92° 15' 10.68" longitud oeste (Figura 1).

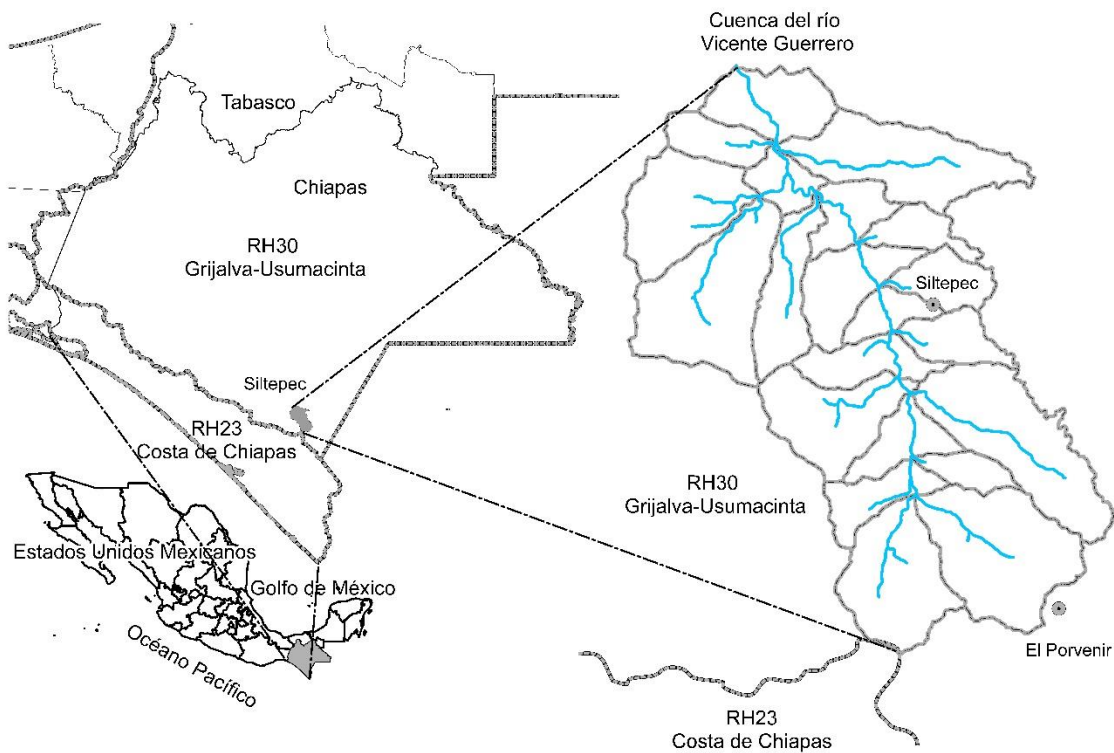


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Vicente Guerrero, Siltepec, Chiapas.

Información utilizada

El modelo digital de elevaciones (MDE) se obtuvo del Continuo de Elevaciones Mexicano, CEM 3.0, en formato ráster con extensión *.bil, que almacena las coordenadas (X , Y), y las elevaciones (Z) de puntos espaciados y distribuidos de modo regular con una resolución de 15 m x 15 m (INEGI, 2013), con las coordenadas que se describen en la descripción de la zona de estudio.

El conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación se obtuvieron de la Serie III, con escala 1:250 000, editada en 2003, con clave D15-2 (INEGI, 2003).

El conjunto de datos vectoriales edafológicos se obtuvieron de la Serie II, con escala 1:250 000, editada en 2007, con clave D15-2 (INEGI, 2007).

La información de precipitación corresponde a la precipitación diaria en las estaciones meteorológicas convencionales 7339-El Porvenir y 7224-Chicomuselo (SMN, 2017).

El modelo hidrológico utilizado fue el HEC HMS 4.2.1 (Feldman, 2000) y su manual de referencia (Scharffenberg, 2015).

El modelo hidráulico bidimensional utilizado fue el IBER, versión 2.4.3 (IBER, 2014), y su manual de referencia (Bladé *et al.*, 2014).

Metodología

La Figura 2 muestra en forma de diagrama de bloques los diferentes componentes y etapas de la metodología utilizada. Los principales componentes de la metodología (Figura 2) son la recopilación de la información, modelación hidrológica y modelación hidráulica.

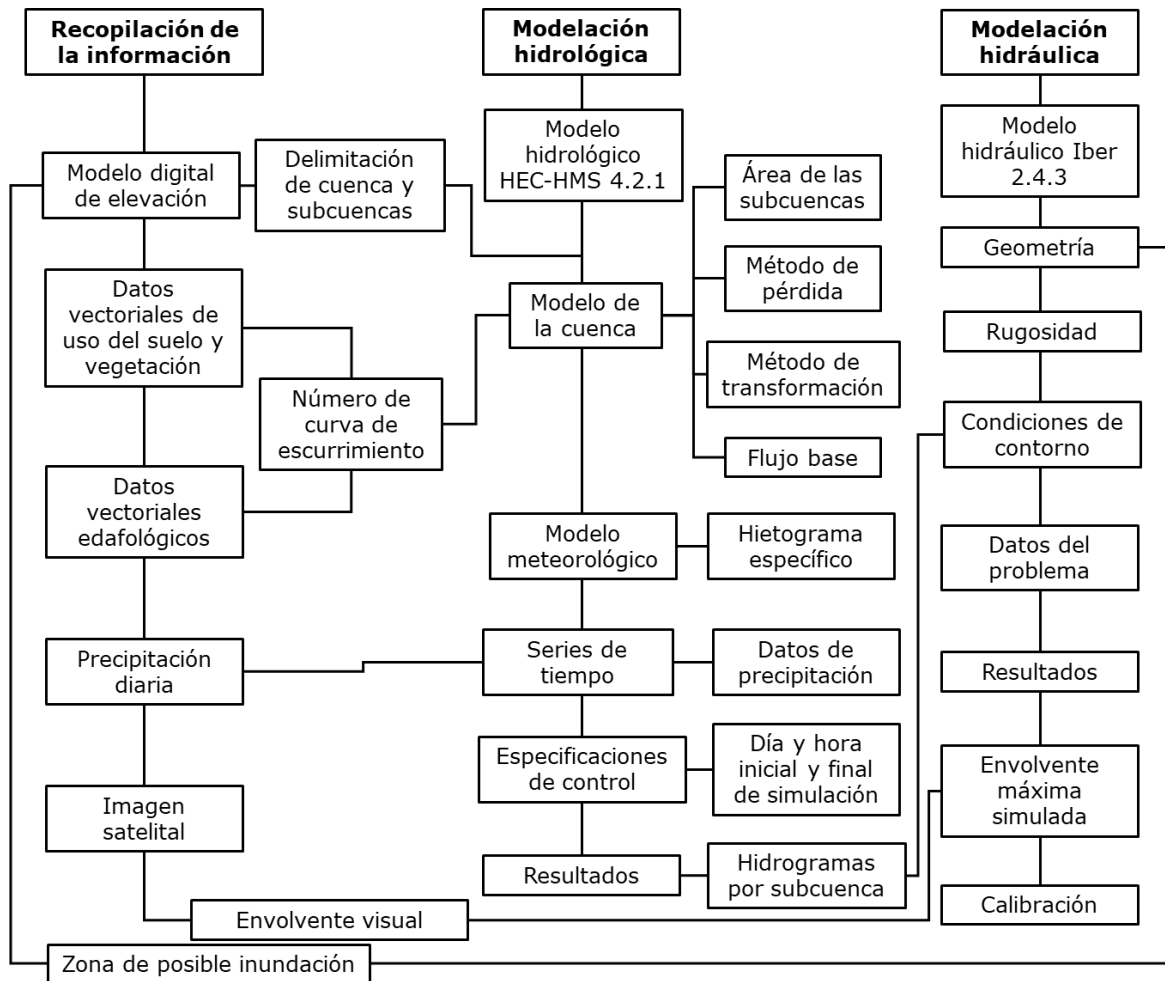


Figura 2. Diagrama general de la investigación, elaboración propia.

Recopilación de la información

A partir del modelo digital de elevación —con el uso del sistema de información geográfica ArcGis (ESRI, 2016) y la extensión ArcSwat (Winchell, Srinivasan, Di-Luzio, & Arnold, 2013)— se delimitaron 21 subcuencas y se obtuvo la hidrografía (Figura 3). Para la cuenca y cada subcuenca se calculó el área, la longitud máxima de su cauce, pendiente media, tiempo de retraso, tiempo de concentración, flujo base y número de curva de escurrimiento ponderado (Tabla 1).



Figura 3. Subcuencas del río Vicente Guerrero, Siltepec, Chiapas.

Tabla 1. Parámetros por subcuenca para la modelación hidrológica.

Núm.	Nombre	A (km ²)	Lc (km)	Sc (adim.)	Tr (min)	Tc (min)	Fb (m ³ /s)	CN
1	Nuevo Siltepec	9.58	5.72	0.023	72.98	121.63	0.00	59.51
2	Nueva Independencia	5.14	4.82	0.097	37.2	62	0.50	61.63
3	Juan Sabines	17.54	11.07	0.087	74.05	123.42	0.50	70.81
4	Rancho Escondido	4.2	4.15	0.027	51.19	85.32	0.00	59.16
5	Cruz de Piedra	9.27	8.59	0.095	57.27	95.45	0.50	65.76
6	Retiro	14.37	6.55	0.049	64.15	106.92	0.25	72.61
7	Vega Guerrero-Cruz de Piedra	5.59	4.59	0.022	60.31	100.52	0.00	69.6
8	Escobillal	4.53	5.06	0.128	34.69	57.82	0.50	73.46
9	Vega Guerrero	9.02	5.59	0.027	67.71	112.85	0.00	77.88
10	Mezcales	5.79	5.01	0.176	31.94	53.23	0.30	77.14
11	San Bartolo	3.99	3.45	0.036	41.22	68.7	0.00	84.49
12	Ángel Díaz	21.04	9.6	0.076	72.61	121.02	0.25	64.04
13	20 de Noviembre	5.6	5.7	0.174	34.66	57.77	0.20	73.67
14	San José Obrero	6.58	4.81	0.107	37.02	61.7	0.50	68.29

Núm.	Nombre	A (km ²)	Lc (km)	Sc (adim.)	Tr (min)	Tc (min)	Fb (m ³ /s)	CN
15	Toquiancito	13.28	6.52	0.112	47.61	79.35	0.50	50.28
16	12 de Abril	20.86	11.05	0.118	68.19	113.65	0.50	68.44
17	San Lucas	5.8	5.46	0.055	49.08	81.8	0.50	49.92
18	Unión San Lucas	3.48	4.6	0.179	28.62	47.7	0.50	63.95
19	Nueva Libertad	5.98	5.61	0.242	31.16	51.93	0.50	57.71
20	Piedra Blanca	21.2	7.91	0.149	51.6	86	1.50	65.88
21	Madronal	15.72	7.53	0.173	46.04	76.73	1.50	52.08
	Siltepec total	208.56	17.16	0.03	143.01	238.33	9.00	*66.01
Promedio =		9.93	6.35	0.102	50.44	84.07	0.45	*66.01

A = área; Lc = longitud del cauce; Sc = pendiente del cauce; Tr = tiempo de retraso; Tc = tiempo de concentración; Fb = flujo base; CN = valor de curva numérica ponderada; *promedio simple de CN.

El área de la cuenca se determinó a partir del método de polígonos a través de las coordenadas de los vértices de cada subcuenca. La fórmula 1, que permite calcular el área del polígono es (Campos-Aranda, 2011):

$$A = [(x_1 + x_2)(y_1 + y_2) + (x_2 + x_3)(y_2 + y_3) + \dots (x_n + x_1)(y_n + y_1)]/2 \quad (1)$$

Donde x , y son las coordenadas del polígono de cada subcuenca y n es el número de vértices.

La longitud del cauce se obtuvo aplicando la suma de la ecuación de distancia (dc) entre dos puntos a partir de las coordenadas de cada punto de quiebre que conforma al cauce principal (Campos-Aranda, 2011):

$$dc = \sqrt{[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]} \quad (2)$$

$$Lc = \sum_{i=1}^n dc_n \quad (3)$$

Para la estimación de la pendiente promedio del cauce principal se calculó con la expresión siguiente (Campos-Aranda, 2011):

$$Sc = \left[\frac{n}{\frac{1}{\sqrt{s_1}} + \frac{1}{\sqrt{s_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{s_n}}} \right]^2 \quad (4)$$

En la cual n es el número de tramos iguales en los cuales se divide el cauce principal y S_i son las pendientes de cada tramo, con $i = 1, 2, 3, \dots, n$ y estimadas como h_i/l_i .

El tiempo de concentración fue calculado como el promedio de las ecuaciones de Kirpich, Témez y Passini (Vélez-Upegui & Botero-Guérrez, 2011):

Témez:

$$T_c = 0.3 \left[\frac{L_c}{S_c^{0.25}} \right]^{0.76} \quad (5)$$

Passini:

$$T_c = \frac{[0.108(A L_c)^{1/3}]}{S^{0.5}} \quad (6)$$

Kirpich:

$$T_c = 0.000325 \frac{L_c^{0.77}}{S_c^{0.385}} \quad (7)$$

En donde T_c = tiempo de concentración; L_c = longitud del cauce; S_c = pendiente promedio del cauce; A = área del cauce.

Para el cálculo del tiempo de retraso (Tr), se aplicó la expresión siguiente (Maidment, 1993):

$$Tr = 0.6 T_c \quad (8)$$

Para obtener los valores de número de curva de escurrimiento se aplicó la metodología propuesta por el Servicio de Conservación de Suelos, (SCS) de EUA (Oropeza-Mota, 2007).

En los datos vectoriales de uso del suelo y vegetación que se encontraron en la cuenca son agricultura de temporal anual, agricultura de temporal anual y permanente, agricultura de temporal permanente, bosque de pino-encino, bosque mesófilo de montaña, pastizal inducido, urbano construido, vegetación secundaria arbórea de bosque de pino, vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino, vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino, vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino, vegetación secundaria arbustiva de bosque mesófilo de montaña y vegetación secundaria arbustiva de selva mediana subperennifolia.

De los datos vectoriales edafológicos se identificaron dos clases texturales, que corresponden a media y fina.

La combinación de valores que ocupa más superficie se presenta en la cuenca con 26.09 km², que representa el 12.5 % del total, asignada a un valor de número de curva de escurrimiento de 84, con agricultura de temporal y con clase textural fina.

Para cada subcuenca se calculó el promedio ponderado del número de curva de escurrimiento (CN), obteniéndose los valores que se muestran en la Tabla 1. La media ponderada de CN se calculó debido a que cada combinación de uso de suelo y clase textural tiene una importancia relativa de acuerdo con el área que representa en la cuenca.

Este valor se obtiene multiplicando el valor de CN de cada combinación de condición de uso de suelo y clase textural por el área respectiva (su ponderación) para luego sumarlos y dividir tal suma entre la suma de las áreas, como lo establece la Ecuación (9) (Oropeza-Mota, 2007):

$$CN = \frac{\sum_{i=1}^n x_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (9)$$

Donde:

w_i = área correspondiente a cada condición de uso de suelo y clase textural, km².

x_i = valor de CN asignado a cada condición de uso de suelo y clase textural de 0 a 100.

$i = 1, \dots, n$, número de condición de uso de suelo y clase textural, entero positivo.

Análisis de la precipitación

La precipitación diaria (expresada en mm/día) considerada corresponde a datos de dos estaciones meteorológicas convencionales (EMC) 7339-El Porvenir (01/04/1980-29/09/2014) y 7224-Chicomuselo (16/06/1975-30/11/2016), que se localizan cercanas a la zona de estudio (Figura 4). El periodo considerado fue del 1 al 10 de octubre de 2005 (Figura 5).

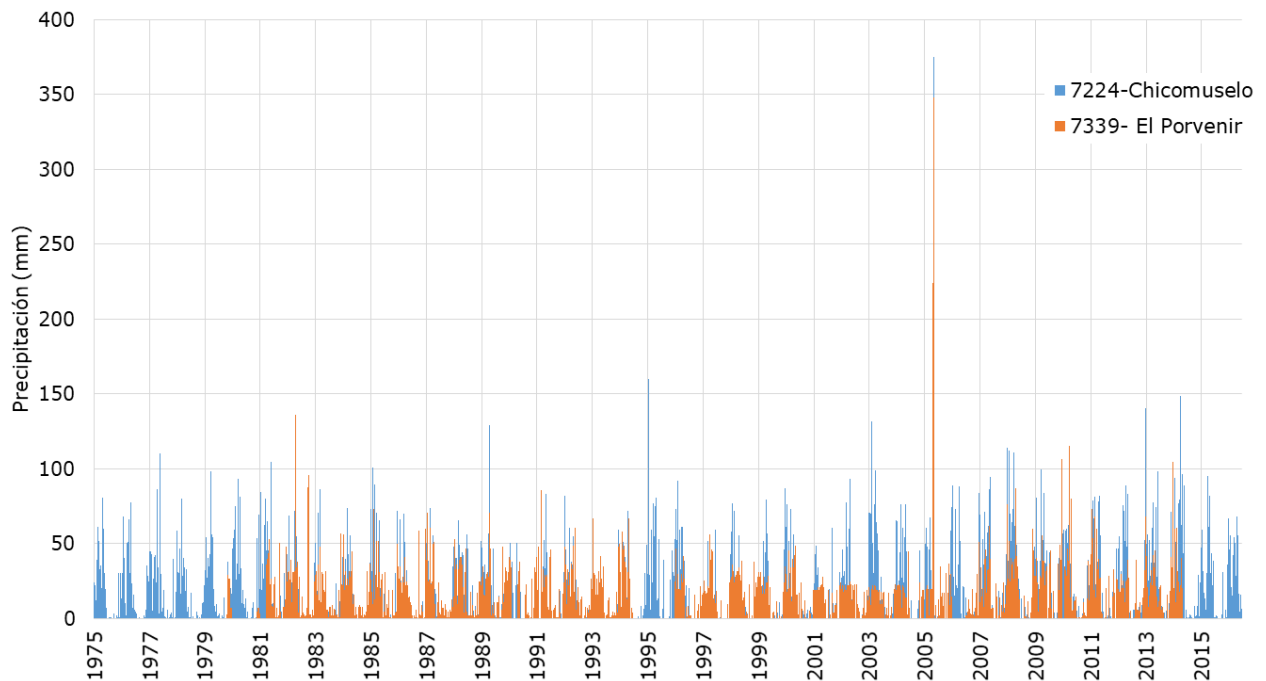


Figura 4. Precipitación histórica de las EMC.

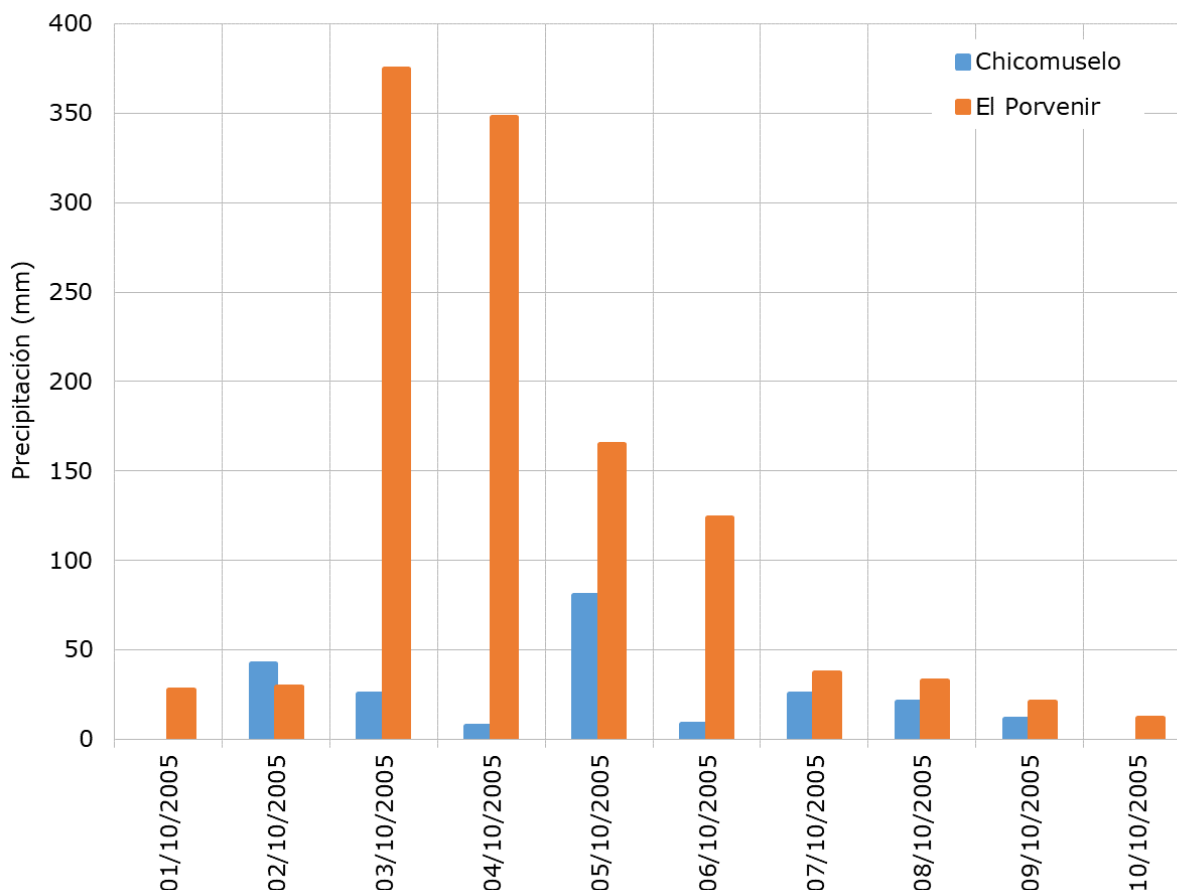


Figura 5. Datos de precipitación registradas en las EMC del 1° al 10 de octubre 2005.

Como se observa en la Figura 5, los datos más altos de precipitación se presentaron en la estación 7339-El Porvenir con 375 mm/día el 3 de octubre de 2005. Aunque en la región, el 5 de octubre de 2005 la estación 7347-Guadalupe Victoria registró 552 mm/día y 7348-Independencia 477 mm/día.

La estación hidrométrica más cercana a la zona de estudio es la estación 30040 Argelia, en el río San Miguel, afluente del río Grijalva. Sin embargo, por la lejanía de la estación los datos no son representativos para lograr una calibración y comparación de los gastos que se generaron debido al huracán Stan.

Para delimitarla envolvente de inundación provocada por el huracán Stan, en el río Vicente Guerrero se utilizó una imagen satelital de Bing Maps desarrollado por Microsoft, de alta resolución, rectificadas, de 25 cm de pixel, tomadas en diciembre de 2005, tres meses después del paso del huracán Stan en la zona. En este proceso se utilizó el sistema de información geográfica ArcGis, a través de la herramienta ArcBru Tile.

Modelación hidrológica

El modelo hidrológico se desarrolló en HEC-HMS. Para construir el modelo geométrico (modelo de la cuenca) se utilizó la información de las subcuencas y la hidrografía. Los principales elementos considerados para interconectar el sistema son subcuencas, cauces, uniones y salida (Figura 6). Una de las partes importantes en este módulo es la asignación del método de cálculo de la pérdida de agua en el sistema hidrológico. Para este estudio se utilizó el método del “número de curva de escurrimiento”

del SCS, asignando un CN ponderado para cada subcuenca; el método de la transformación de lluvia a escurrimiento que se utilizó es del hidrograma unitario del SCS, con un factor de tasa pico de 250, y el flujo base promedio por subcuenca (Tabla 1).

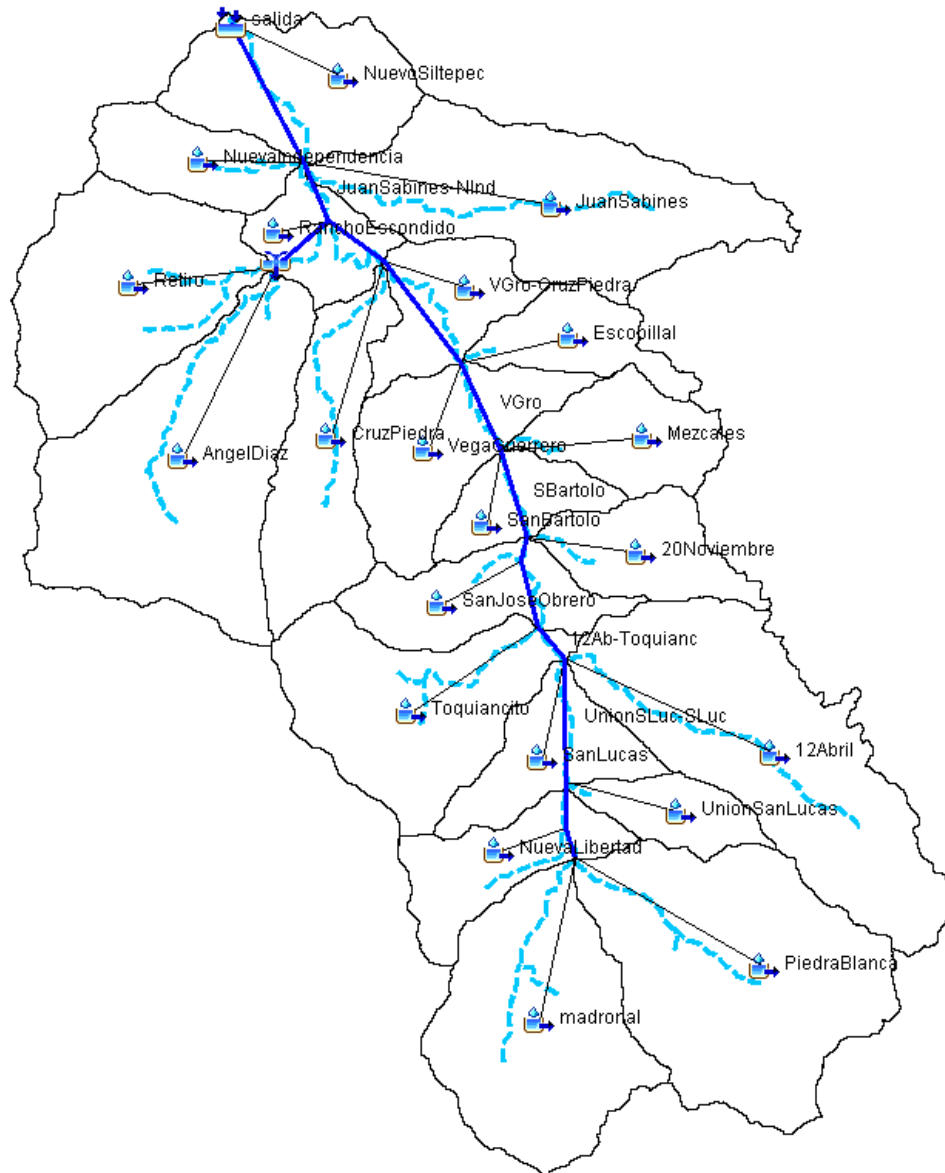


Figura 6. Subcuencas, red hidrográfica y modelo hidrológico de la cuenca del río Vicente Guerrero.

Las series de tiempo que se utilizaron para construir el modelo meteorológico corresponden a la precipitación diaria en mm de las estaciones EMC 7339-El Porvenir y 7224-Chicomuselo para el periodo del 1° al 10 de octubre de 2005. Se utilizó el hietograma específico de cada EMC, que contribuye al escurrimiento en cada subcuenca, para lo cual se definió un área de influencia para cada EMC.

En las especificaciones de control del modelo se definió como fecha de inicio el 1° de octubre de 2005 a las 08:00 h, y como fecha final el 10 de octubre de 2005 a las 08:00 h, con intervalos de tiempo de una hora, debido a que ese periodo abarca las condiciones antes, durante y después del huracán Stan.

Con toda la información específica se corrió el modelo, obteniéndose los diferentes hidrogramas a las salidas de las subcuencas y puntos de interés, resultados que se emplearon para alimentar el modelo hidráulico.

Modelación hidráulica

Para realizar la modelación hidráulica se utilizó el programa IBER. Un primer paso de este programa es la configuración de la geometría del

modelo, que consiste en realizar un levantamiento topográfico para configurar el terreno del tramo de cauce que se requiere estudiar, que en este caso fue de 16 km, iniciando en la comunidad de San Lucas hasta su desembocadura con el río Zacualpan hacia Nueva Independencia. El MDE, en formato *.tif, fue importado a IBER, con el comando GDAL, generando con ello una cuadrícula con resolución de 15 x 15 m.

Los datos que se ingresan al modelo son los siguientes: rugosidad, habiéndose utilizado el valor promedio de Manning de 0.025, que corresponde a un cauce con pedregosidad; condiciones de contorno, que corresponden a los diferentes hidrogramas resultantes de la modelación hidrológica obtenidos con el modelo HEC-HMS en la salida de cada subcuenca; datos de la simulación, que comprenden los valores de tiempo inicial, tiempo final e intervalo de tiempo de la simulación. Una vez que se completa esta fase, se inicia el proceso de simulación. El tiempo de procesamiento del modelo hidráulico fue de 7.5 h.

Los resultados se presentan en archivos tipo ráster para cada paso de tiempo, incluyendo nivel, velocidad (Figura 7 y Figura 9) y peligrosidad (Figura 17).

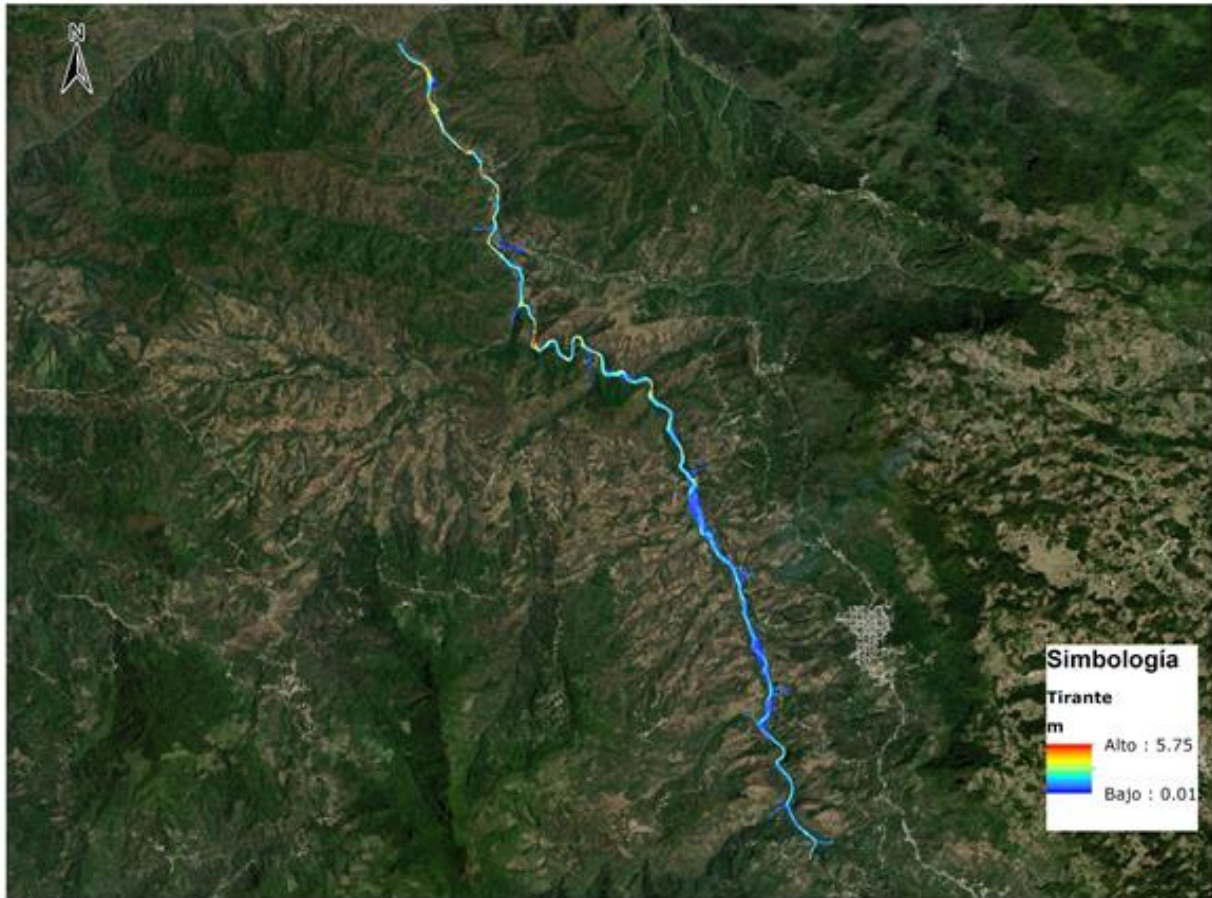


Figura 7. Resultados del modelo hidráulico, niveles del río Vicente Guerrero.

Como se observa en la Figura 7, el nivel promedio del cauce es de 1.5 m y el valor máximo de nivel en el cauce con 5.75 m, resultado que se corrobora en la sección transversal crítica en el cadenamiento 5+550 (Figura 8).

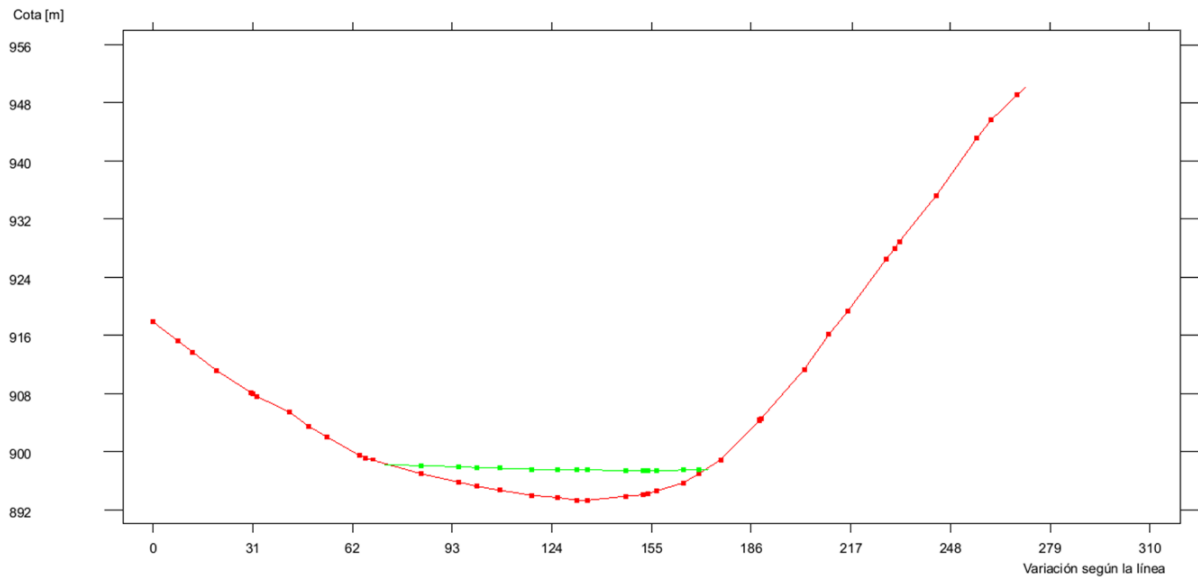


Figura 8. Sección transversal crítica en el cadenamiento 5+500 del río Vicente Guerrero.

Los resultados de la velocidad máxima obtenida en el cauce analizado se presentan en la Figura 9.

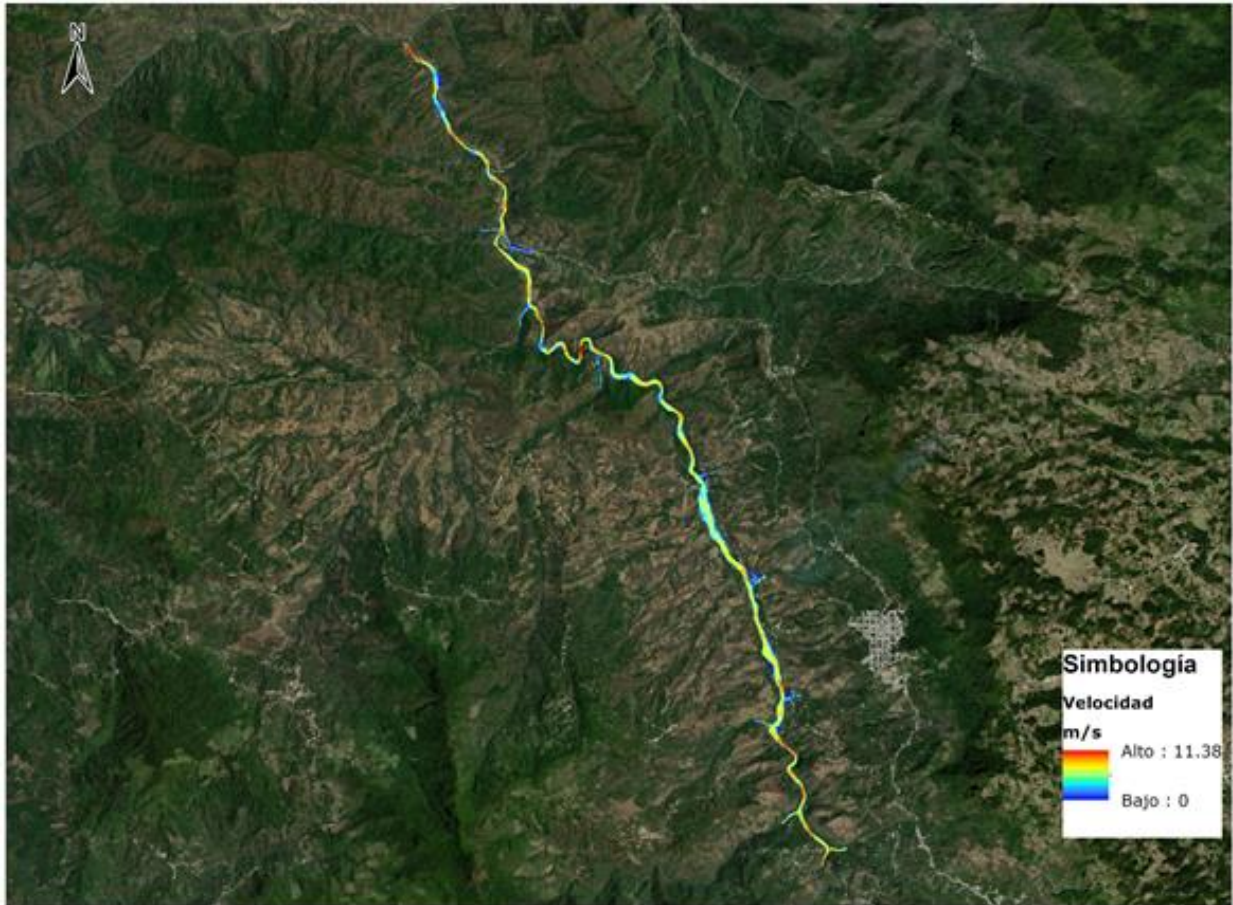


Figura 9. Velocidad del flujo en el río Vicente Guerrero.

En promedio se observa que la velocidad del flujo en el cauce es de 5 m/s, y el valor máximo de 11.38 m/s, presentando las máximas velocidades al centro del cauce y los valores más bajos en las orillas. Con esta información de nivel y velocidad del agua se generó un mapa de peligrosidad.

Calibración y validación de los resultados obtenidos

Para realizar la calibración de la simulación hidrológica e hidráulica debido a que no existe información hidrométrica en la cuenca se utilizó el procedimiento de comparación de las coordenadas X (Figura 11), Y (Figura 12), Z (Figura 13) de la envolvente visual obtenida con una imagen de satélite y los valores obtenidos en la modelación hidráulica (Figura 10).

El procedimiento para realizar la calibración consistió en trazar un cadenamiento por el eje central del cauce a cada 100 m, generando con ello secciones transversales al cauce, obteniendo así las coordenadas X , Y , Z de la envolvente simulada y de la envolvente visual (Figura 10). Realizando los análisis se obtuvo la siguiente distribución de puntos analizados de acuerdo con sus pares observados entre visuales y simulados, a los que se le aplicó una correlación lineal.



Figura 10. Envolvente visual elaborada en la imagen satelital vs. envolvente obtenida de la modelación hidráulica.

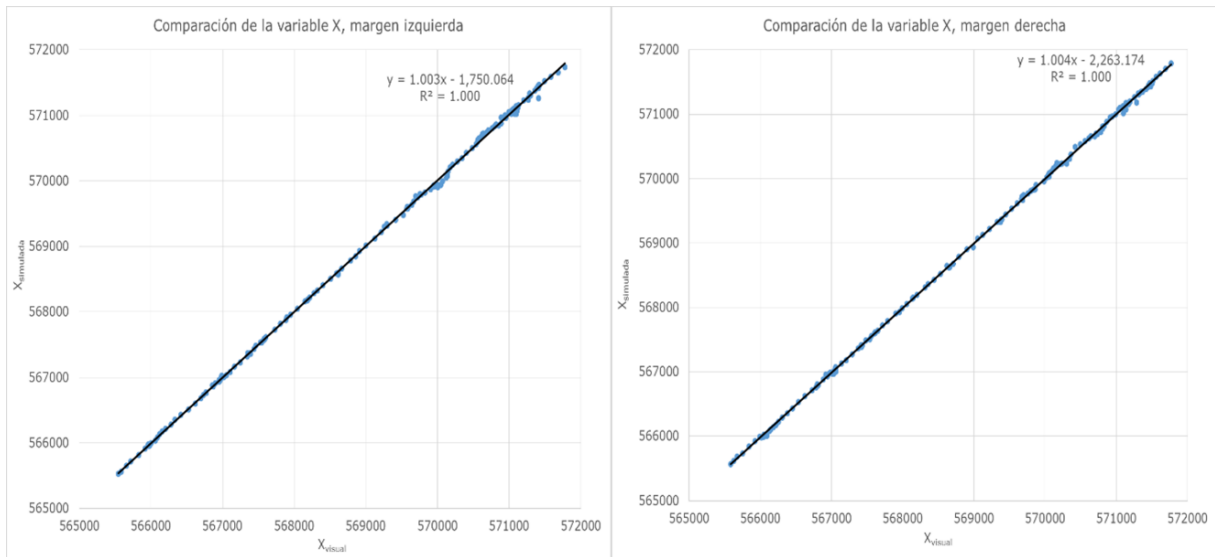


Figura 11. Comparación de las coordenadas X.

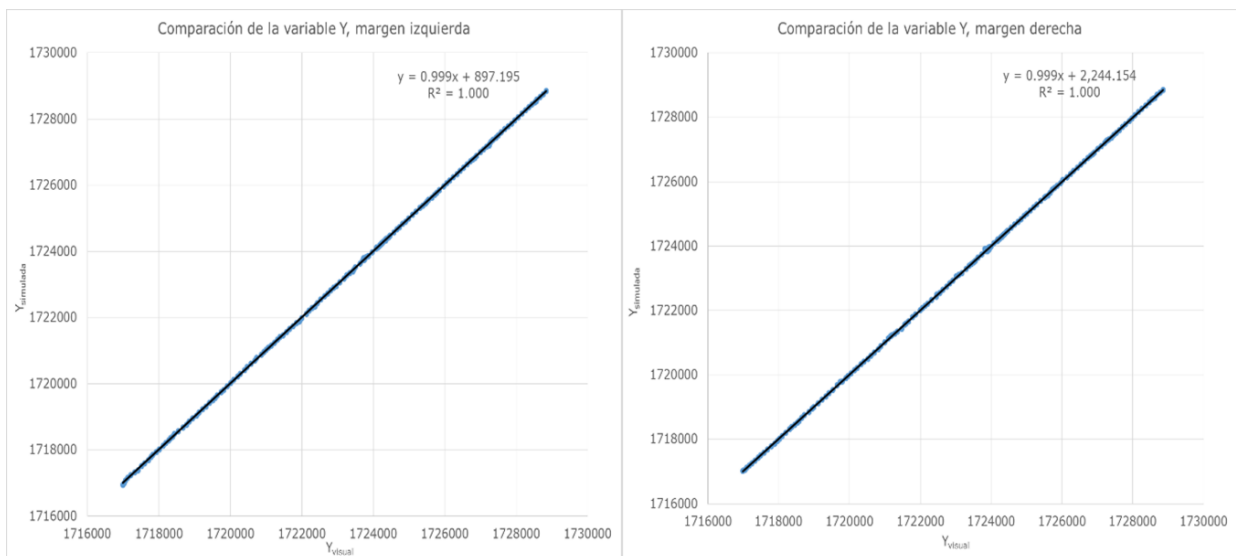


Figura 12. Comparación de las coordenadas Y.

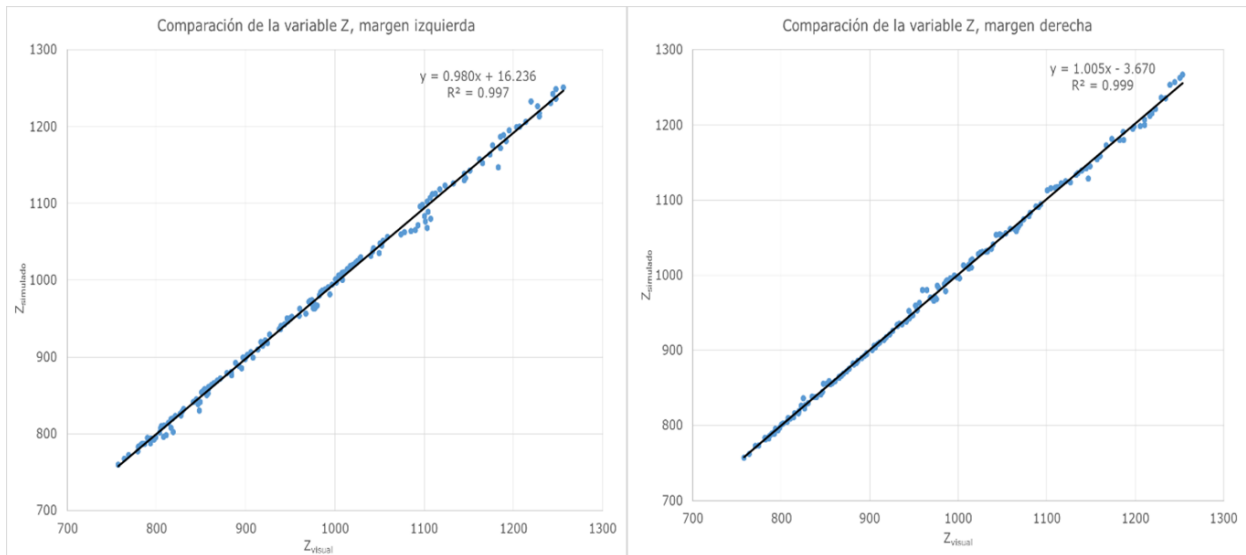


Figura 13. Comparación de las coordenadas Z.

A partir de la comparación de las coordenadas se puede observar que la variable Z (elevación en m) es la que presenta más variación. Sin embargo, se puede ver claramente un buen ajuste con un $r^2 = 0.99$ en todos los casos.

Resultados y discusión

Mediante la metodología aplicada, descrita en la Figura 2, fue posible estimar la validez del modelo hidrológico-hidráulico con los datos del huracán Stan, que se presentó del 3 al 6 de octubre de 2005. Para esto se identificaron 21 subcuencas que presentan las siguientes características: área promedio, 9.93 km²; longitud promedio del cauce de 6.35 km; pendiente promedio de los cauces en cada subcuenca de 0.102; tiempo promedio de retraso de 50.4 min, y un valor de curva número de escurrimiento de 66.

Del estudio meteorológico se estableció que en la estación 7347-Guadalupe Victoria se presentó una precipitación de 552 mm/día y en la estación 7348-Independencia se tuvo una precipitación de 477 mm/día, que son los valores más elevados que se registraron durante el evento del huracán Stan el 5 de octubre de 2005. Estos valores son mucho más elevados que los reportados por Dardón y Morales (2006), y Murcia y Macías (2009).

Con la modelación hidrológica se obtuvo a la salida de la cuenca el hidrograma que se presenta en la Figura 14, sin embargo no se dispone de una estación hidrométrica para su calibración, al igual que la bibliografía revisada no presenta datos de peligrosidad en el río Vicente, Guerrero.

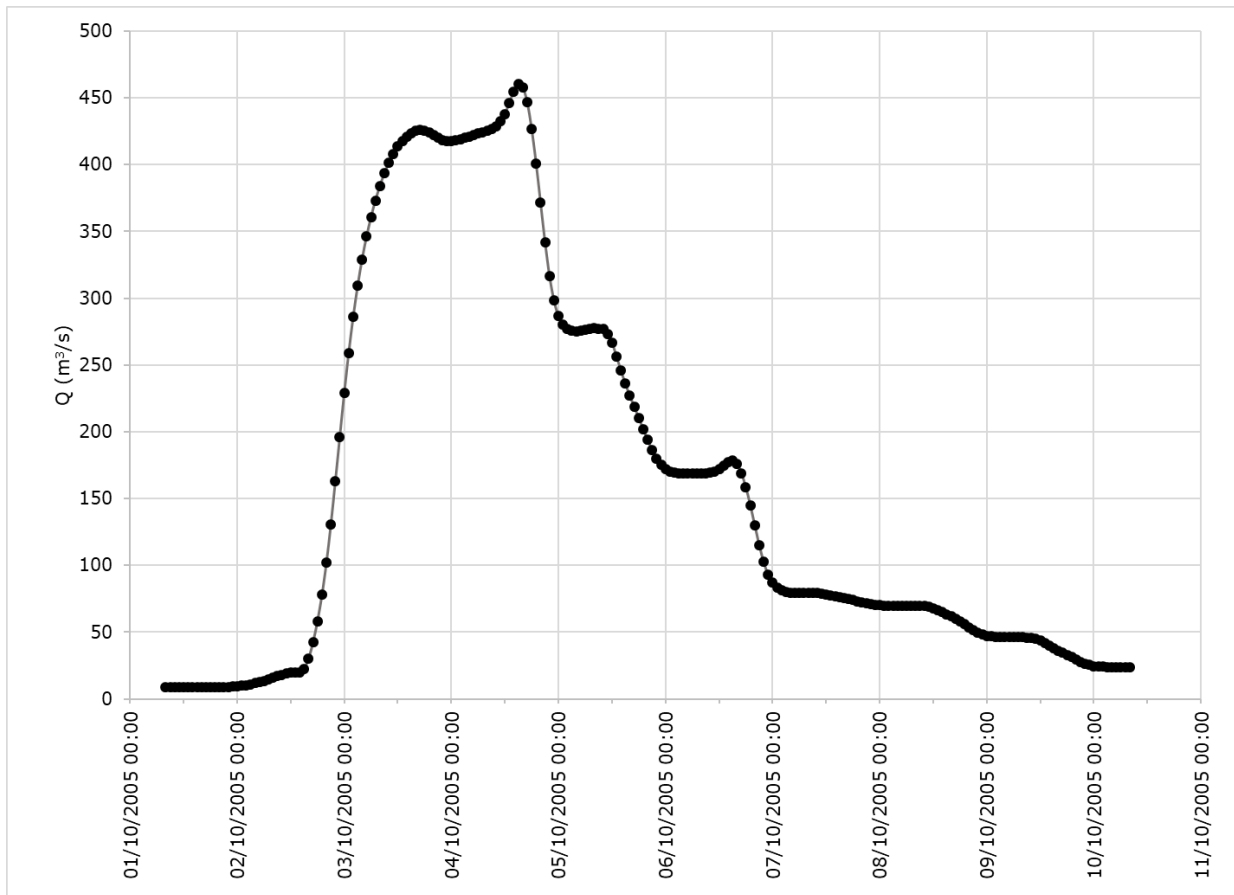


Figura 14. Hidrograma a la salida de cuenca del río Vicente Guerrero durante el desarrollo del huracán Stan, simulación hidrológica.

A partir de la modelación hidrológica con HEC-HMS se observa que el valor pico en el hidrograma se alcanzó el 4 de octubre 2005 a las 15:00 h, con 460.1 m³/s (Figura 15).

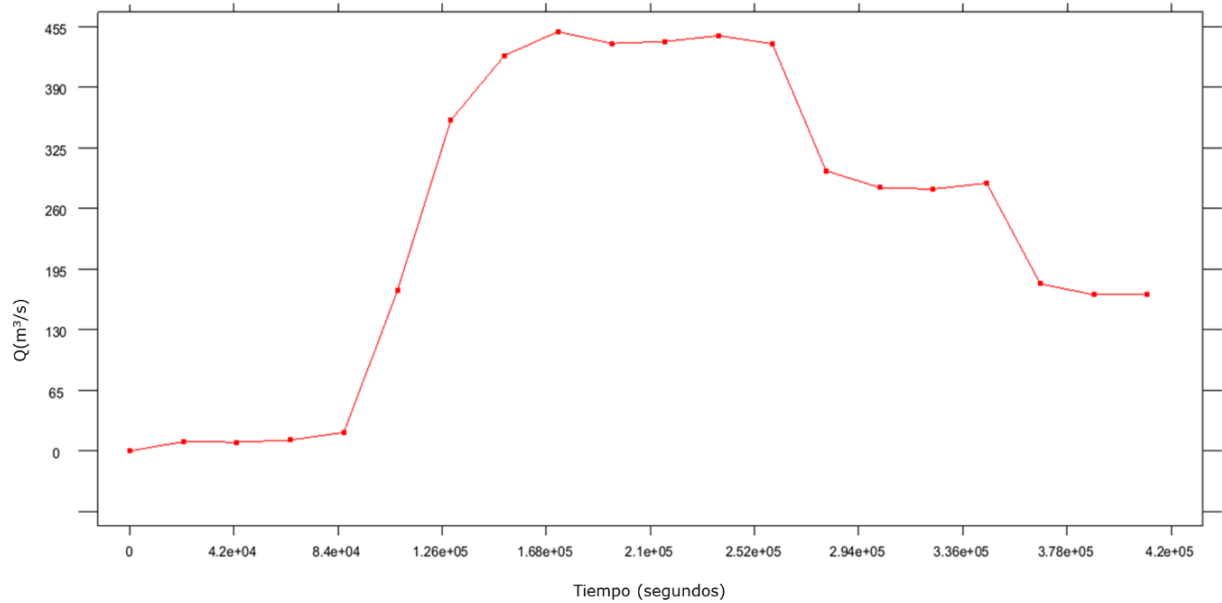


Figura 15. Hidrograma a la salida de la cuenca, simulación hidráulica.

De la modelación hidráulica se observa que el valor máximo calculado a la salida del cauce simulado es de 450 m³/s.

Con esta información, también se observa que el huracán Stan generó un ancho de banda en promedio a lo largo de 16 km del río Vicente Guerrero de 71 m y un ancho máximo aproximado de inundación de 197 m en cada margen.

Con este escenario extremo se generó el mapa de peligrosidad de acuerdo con la norma ACA (esta norma clasifica una inundación en un punto dado como de peligro según el valor del tirante, velocidad y el producto de ambos), norma que se encuentra en IBER (Agencia Catalana del Agua, 2004), identificando las zonas de peligrosidad elevada,

moderada y nula. El mapa de peligrosidad de los resultados hidráulicos (tirante y velocidad) tiene incorporada la metodología según el Real Decreto 9/2008, en donde se establece como zona en la que se pueden producir daños graves sobre las personas y los bienes aquella que cumple uno o más de los siguientes criterios: que el tirante sea superior a 1 m, la velocidad sea superior a 1 m/s o que la velocidad por el tirante sea superior a $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ (BOE, 2008) (Figura 16).

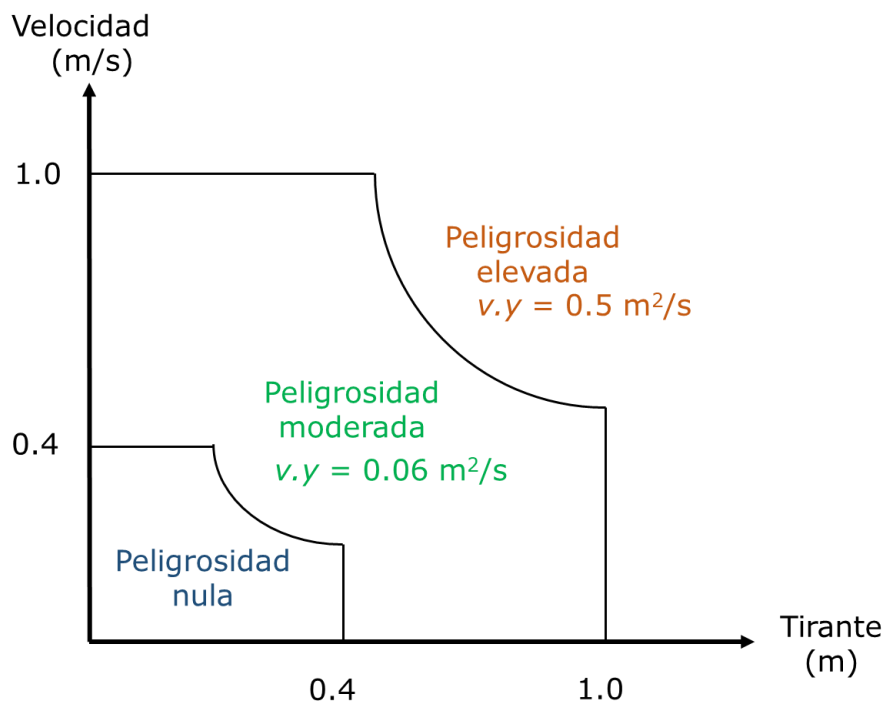


Figura 16. Criterios de peligrosidad.

Los valores de máximo nivel de agua registrados de 4.3 m y máxima velocidad de 11.6 m/s se presentan en el centro del cauce, por lo que es ahí donde se existe la máxima peligrosidad, considerada como peligrosidad “elevada” de acuerdo con ACA (Figura 17).

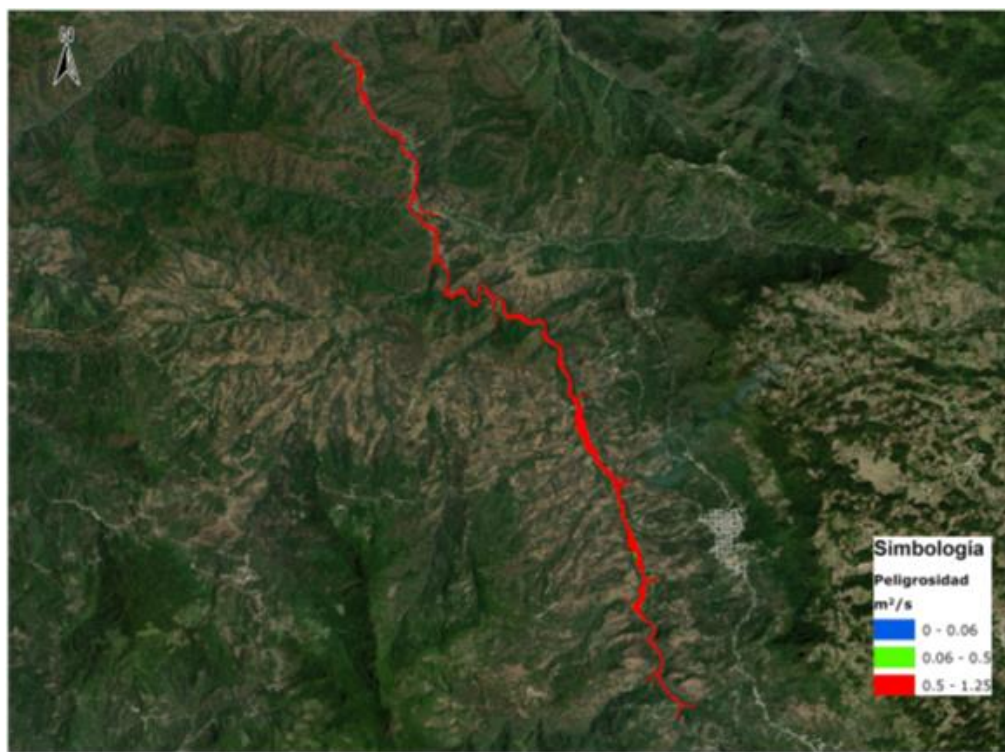


Figura 17. Peligrosidad en el río Vicente Guerrero durante el huracán Stan.

Como se observa en la Figura 17, más del 80 % de la superficie de la envolvente presenta un valor de peligrosidad elevada de acuerdo con la clasificación ACA.

Conclusiones

El huracán Stan es uno de los fenómenos hidrometeorológicos que más impacto hidrológico e hidráulico ha dejado en el cauce del río Vicente Guerrero, Siltepec, Chiapas, debido a las altas precipitaciones registradas de hasta 552 mm/día que se presentaron del 3 al 6 de octubre de 2005, lo que dio lugar a una descarga máxima de 460.1 m³/s el 4 de octubre de 2005 a las 15:00 h. En estas fechas se generaron bandas de inundación de 191 m de ancho. La sección transversal crítica se estimó que corresponde al cadenamiento 5+500.

Con la metodología utilizada en este estudio fue posible calibrar los resultados de la modelación hidrológica e hidráulica mediante la comparación de la envolvente obtenida de una imagen satelital de diciembre de 2005, que registró la mancha de afectación del paso del huracán, comparando las coordenadas X, Y, Z del evento simulado contra el observado, alcanzando un $r^2 = 0.99$ para cada margen.

Se generaron mapas de peligrosidad que son importantes en la cuantificación del riesgo. En este caso, con la información se generó un

“mapa de peligrosidad” de acuerdo con la Norma ACA de IBER; se presentó más de un 80 % del área con peligrosidad elevada.

Referencias

- Agencia Catalana del Agua. (2004). *Guía técnica. Recomendaciones técnicas para el diseño de infraestructuras que interfieren con el espacio fluvial*. Cataluña, España: Agencia Catalana del Agua.
- Agudelo-Otálora, L. M., Moscoso-Barrera, W. D., Paipa-Galeano, L. A., & Mesa-Sciarrotta, C. (2018). Comparación de modelos físicos y de inteligencia artificial para predicción de niveles de inundación. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(04), 209-236. Recuperado de <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-04-09>
- Aldama, Á. A. (2000). Hidrología de avenidas. Conferencia Enzo Levi 1998. *Ingeniería Hidráulica en México*, 16(3), 5-46.
- Álvarez-Gordillo, G. D. C., Álvarez-Gordillo, L. M., Eroza-Solana, E., & Dorantes-Jiménez, J. E. (2008). Propuesta educativa para la gestión del riesgo de desastres en la región Sierra de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, 13(38), 919-943.
- Arellano-Monterrosas, J. L. (2012). *Vulnerabilidad y gestión de riesgos por deslizamientos e inundaciones en la cuenca superior del río Huehuetán, Chiapas* (tesis doctoral). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México.
- Ba, K. M., Díaz-Delgado, C., & Rodríguez-Osorio, V. (2001). Simulación

- de caudales de los ríos Amacuzac y San Jerónimo en el Estado de Mexico , México. *Ingeniería Hidráulica en México*, 16(4), 117-126.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., ... & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1-10. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Boletín Oficial del Estado (BOE). (2008). *Real Decreto 9/2008*.
- Campos-Aranda, D. F. (2011). *Estimación y aprovechamiento del escurrimiento* (reimpresión). San Luis Potosí, México: edición del autor.
- Campos-Aranda, D. F. (1994). Modelo matemático determinístico para pronóstico de crecientes en cuencas rurales. *Ingeniería Hidráulica en México*, 9(1), 43-62.
- Campos-Aranda, D. F. (1991). Propuesta de criterios para la elaboración de estudios hidrológicos (primera parte). *Ingeniería Hidráulica en México*, septiembre-diciembre, 23-40.
- Camp Dresser & McKee (CDM). (2001). *Evaluation of Integrated Surface Water and Groundwater Modeling Tools*. Inglaterra: CDM. Recuperado de http://www.mikepoweredbydhi.com/upload/dhisoftwarearchive/papersanddocs/waterresources/MSHE_Code_Evaluations/CDM_ISGW_Report.pdf
- Cenapred, Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2005). *Serie 7*.

impacto socioeconómico de los desastres en México. Características e impactos socioeconómicos de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2005. Marín-Cambranis, R., & Ramos-Radilla, V. (ed.). México, DF, México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Cenapred, Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2001). Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. En: *Centro Nacional de Prevención de Desastres*. Recuperado de <http://www.cenapred.unam.mx>

Dardón, J., & Morales, C. (2006). *¿Por qué tanta destrucción? Las amenazas naturales y estructurales: sistematización de la vulnerabilidad, negligencia y la exclusión regional del altiplano occidental en la tormenta asociada Stan.* Guatemala, Guatemala: Editorial de Ciencias Sociales. Recuperado de <http://biblio3.url.edu.gt/Libros/destruccion.pdf>.

DOF. (2005). *DOF - Diario Oficial de la Federación*, 21/10/2005.

ESRI, Environmental Systems Resource Institute. (2016). *ArcGIS Desktop: Release 10.4.* Redlands, USA: Environmental Systems Resource Institute.

Feldman, A. D. (2000). *Hydrologic modeling system HEC-HMS, Technical Reference Manual.* Recuperado de <https://doi.org/CDP-74B>

Godínez-Acosta, A. (1990). Problemática del desarrollo de la hidrología. *Ingeniería Hidráulica en México*, número especial (octubre), 22-38.

Hacienda del Estado de Chiapas. (2005). Programa emergente: "Huracán

- Stan". En: *Tomo 1- Resultados generales 2005* (pp. 77-81). Tuxtla Gutiérrez, México: Hacienda del Estado de Chiapas.
- Hernández-Unzón, A., & Bravo, C. (2005). *Resumen del huracán "Stan" del Océano Atlántico*. Recuperado de <https://xdoc.mx/documents/stan-servicio-meteorologico-nacional-5f74051c82dba>
- Ibáñez-Castillo, L. A., Alonso-Sánchez, H., Arteaga-Ramírez, R., & Vázquez-Peña, M. A. (2014). Identificación de curva de escurrimiento en tres microcuencas del río Coatán, Chiapas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(4), 153-161.
- IBER. (2014). *Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas - Manual de referencia hidráulico* (p. 59). España: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Instituto Flumen (FLUMEN), Grupo de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (GEAMA), Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). España. recuperado de <https://www.iberaula.es/space/54/downloads>.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2013). *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0)*. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoelevaciones.aspx>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2007). *Conjunto de datos vectoriales edafológicos. Escala 1:250,000. Serie II (Continuo Nacional)*. México, DF, México: Instituto Nacional de Estadística y

Geografía.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2003). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250,000. Serie III*. México, DF, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Juárez-Méndez, J., Ibáñez-Castillo, L. A., Pérez-Nieto, S., & Arellano-Monterrosas, J. L. L. (2009). Uso del suelo y su efecto sobre los escurrimientos en la cuenca del río Huehuetán. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 1(2), 69-76. Recuperado de <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2009.07.015>

Larios-Tlali, H., Torres-Benites, E., Quevedo-Nolasco, A., Martínez-Menes, M. R., & Salgado-Tránsito, J. A. (2015). Riesgo de inundación en la subcuenca del río La Antigua, Veracruz, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(3), 39-56.

Maidment, D. R. (1993). *Handbook of Hydrology*. New York, 28, 1424. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/0141-4607\(86\)90100-9](https://doi.org/10.1016/0141-4607(86)90100-9)

Martín-vide, J. P. (2013). Erosión , sedimentación y restauración de ríos. Ejemplos de ingeniería e investigación. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(5), 5-18.

Martínez-Velasco, G., Lopez-Ochoa, M. S., Álvarez-Gordillo, G., & Schmook, B. (2016). Desastres, desplazamiento interno y migración laboral en la Sierra de Chiapas. *Papeles de Población*, 22(87), 201-232.

Mejía-Estrada, P. I., Rodríguez-Rincón, J. P., & Pedrozo-Acuña, A. (2015).

- Análisis del evento hidrometeorológico extremo en Acapulco, Guerrero, 2013: lecciones aprendidas. *Revista digital Tláloc AMH*, 66(enero-marzo), 7-19.
- Murcia, H. F., & Macías, J. L. (2009). Registro geológico de inundaciones recurrentes e inundación del 4 de octubre de 2005 en la ciudad de Tapachula, Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(1), 1-17.
- Oropeza, J. L. (1999). Modelos matemáticos y su aplicación al manejo de cuencas hidrográficas. *IX Congreso Nacional de Irrigación*, 21-28. Sinaloa, México.
- Oropeza-Mota, J. L. (2007). *Conservación del suelo y del agua: métodos para calcular pérdida de suelo en terrenos agrícolas de ladera y cuencas pequeñas* (núm. 1). Chapingo, México: edición del autor, notas del curso.
- Pérez-Luna, G. (2015). *Modelación hidrológica continua para fines de pronóstico de avenidas en ríos*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Pérez-Nieto, S. (2013). *Erosión hídrica en cuencas costeras de Chiapas y estrategias para su restauración hidrológico-ambiental*. Montecillo, México: Colegio de Postgraduados.
- Pérez-Nieto, S., Arellano-Monterrosas, J. L., Ibáñez-Castillo, L. A., & Hernández-Saucedo, F. R. (2012). Estimación de la erosión hídrica provocada por el huracán Stan en las cuencas costeras de Chiapas, México. *Terra Latinoamericana*, 30(2), 103-110.

- Reyes-Hernández, D. I. (2006). *Por la promoción a una cultura de protección civil aplicada al municipio de Tapachula de Córdoba y Ordóñez , Chiapas. Caso huracán Stan de octubre 2005. Capítulo III. El "huracán Stan" en el estado de Chiapas. Consecuencias.* Puebla, México: Universidad de las Américas Puebla.
- Sabines-Guerrero, J. J. (2006). *Decreto por el que se crea la comisión especial de reconstrucción para las zonas afectadas por Stan.* México D.F. Recuperado de https://www.senado.gob.mx/64/gaceta_del_senado/documento/9708
- Salas, M. A. (1999). *Obras de proteccion contra inundaciones.* México, DF, México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Salazar-Briones, C., Hallack-Alegría, M., Mungaray-Moctezuma, A., Lomelí, M., Lopez-Lambraño, A., & Salcedo-Peredia, A. (2018). Modelación hidrológica e hidráulica de un río intraurbano en una cuenca transfronteriza con el apoyo del análisis regional de frecuencias. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(03), 48-74. Recuperado de <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-04-03>
- Scharffenberg, W. (2015). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual. Version 4.1.* Recuperado de http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/documentation/HEC-GeoHMS_Users_Manual_10.1.pdf
- Singh, V. P. (1995). *Computer models of watershed hydrology.* Colorado, USA: Water Resources Publications.

- SMN, Servicio Meteorológico Nacional. (2017). *Estaciones Climatológicas 2016*. Recuperado de <http://smn.cna.gob.mx/tools/RESOURCES/estacion/EstacionesClimatologicas.kmz>
- Texas A&M. (2015). *Bureau of Reclamation*. Recuperado de <http://hydrologicmodels.tamu.edu/models.htm>
- Torres, M. A., Nikolskii, I., Martínez-Miranda, M. E., & Martínez, M. R. (2018). Evaluación hidrológica de la cuenca del río Teapa, utilizando el modelo MIKE-SHE. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(06), 130-146. Recuperado de <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-04-06>
- Vargas-Castañeda, G., Ibáñez-Castillo, L. A., & Arteaga-Ramírez, R. (2015). Development, classification and trends in rainfall-runoff modeling. *Ingeniería agrícola y biosistemas*, 7(1), 5-21. Recuperado de <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2015.03.002>
- Vélez-Upegui, J. J., & Botero-Guérrez, A. (2011). Estimación del tiempo concentración y de rezago en la cuenca experimental urbana de la Quebrada San Luis, Manizales. *Dyna*, 78(165), 58-71.
- Winchell, M., Srinivasan, R., Di-Luzio, M., & Arnold, J. (2013). *SWAT Help*. Temple, USA: Texas Agrilife Research, United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service. Arcswat interface for SWAT2012.
- Zúñiga-Malpica, D. (2010). Zona de inundación de la cuenca hidrológica del río Yautepec. *Revista Digital Tláloc AMH*, 46(enero-marzo), 19-35.