

¿SON ACEPTABLES EN LA COSTA DE CHIAPAS, MÉXICO, LAS TORMENTAS SINTÉTICAS DEL SCS DE 24 Y 6 HORAS DE DURACIÓN?

ARE ACCEPTABLE IN THE COAST OF CHIAPAS, MEXICO, THE SCS SYNTHETIC STORMS OF 24 AND 6 HOURS OF DURATION?

J. Evani Morales-Hernández¹; Laura A. Ibáñez-Castillo¹; José Reyes-Sánchez¹; Ramón Arteaga-Ramírez¹; Mario A. Vázquez-Peña¹; Adolfo López-Pérez²

¹Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, México, MÉXICO. C. P. 56230.

²Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, MÉXICO. C. P. 56230

Correo-e: libacas@gmail.com (*Autor para correspondencia)

RESUMEN

Considerando que las estructuras hidráulicas importantes son diseñadas con tormentas hipotéticas de duraciones de 6 o 24 horas, en este trabajo se revisó el patrón de distribución temporal de varias tormentas en la Costa de Chiapas, en especial aquellas de duración de 24 y 6 horas y algunas de menor duración. Se tuvo como referencia el patrón de distribución de tormentas sintéticas para diseño del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos de Norteamérica Tipo III propuesto para zonas costeras. La información se obtuvo de pluviogramas para los meses de abril a noviembre del 2011 y el Huracán Stan de octubre del 2005; se eligieron tormentas de seis sitios instrumentados con pluviógrafos. Se utilizaron como parámetros estadísticos de comparación el coeficiente de Nash-Sutcliffe, el Error Relativo y el Error Medio Cuadrático. En el caso de las tormentas de 24 horas sus coeficientes de Nash-Sutcliffe tomaron valores de entre 0.46 y 0.89; Errores Relativos entre 3.8 y 17 % y el Error Medio Cuadrático entre 9.26 y 17.37 %. En el caso de las tormentas de 6 horas solo un 50 % de los eventos presentaron un buen ajuste con coeficientes de Nash-Sutcliffe entre 0.3 y 0.98; Errores Relativos de 0.3 a 9.1 % y el Error Medio cuadrático entre 3.71 y 16.40 %, y cuando no había un buen ajuste, el SCS subestimaba las intensidades de las tormentas de duración de 6 horas. Se encontró que los hietogramas de las tormentas de duraciones menores a 6 horas tuvieron una distribución triangular.

PALABRAS CLAVE: Distribución temporal de la lluvia, tormentas hipotéticas del SCS, diseño de estructuras hidráulicas.

ABSTRACT

Taking into account that important hydraulic structures are designed with hypothetical storms of 6 or 24 hours durations, in this research it was reviewed the time distribution of several rainfall events in the Coast of Chiapas in Mexico, especially those of duration of 24 and 6 hours and some of smaller duration. The reference pattern was that of the U. S. Service Conservation Soil (SCS) synthetic design storm type III for coastal areas. The data was obtained for year 2011, from April to November, and for October 2005, when occurred Stan Hurricane; the storms were distributed through 6 study sites instrumented with pluviographs. The Nash-Sutcliffe coefficient and the Relative error were the statistical parameters used as comparative criteria. In the case of 24-hours rainfall duration, their Nash-Sutcliffe coefficients presented values between 0.46; 0.89 and Relatives Error between 3.8 and 17 % and Standard Error between 9.26 and 17.37 %. In the case of the 6-hours rainfall duration only a 50 % of the events presented a good fit with Nash-Sutcliffe coefficients between 0.3 and 0.98; Relative Errors between 0.3 and 9.1 % and Standard Error between 3.71 and 16.40 % and when there was no good fit, the SCS intensity 6-hours duration values were below the real storm intensity values. Also it was found that the hietographs for durations less than 6 hours presented a triangular distribution.

KEYWORDS: Rainfall time distribution, hypothetical SCS storms, design of hydraulic structures.



doi: 10.5154/r.inagbi.2014.04.001

INTRODUCCIÓN

El término tormenta diseño es usado para referirse a un hietograma de lluvia que se cree tiene las características que son críticas a la seguridad del proyecto de una obra hidráulica (Levy and McCuen, 1999). Un hietograma es una gráfica de barras, donde se dibuja tiempo versus lámina de lluvia. El hietograma se dibuja para incrementos de tiempo que van desde unos minutos hasta un par de horas (Aparicio, 2011). Por la razón anterior, generalmente la información para construir un hietograma viene de equipo de medición tal como un pluviógrafo o una estación meteorológica automática; es una tarea difícil y solo aproximada el construir un hietograma a partir de información de un pluviómetro que reporta información cada 24 horas, como es el caso de la red de pluviómetros Mexicanos y que comúnmente reportan las bases de datos meteorológicos.

Levy y McCuen (1999) señalan que aunque el término tormenta diseño es frecuentemente criticado, éste aun es un método de diseño dominante en Ingeniería hidrológica. Una tormenta diseño puede ser una distribución temporal sintética basada en características inherentes a las curvas intensidad-duración-frecuencia o en un hietograma real que causó grandes inundaciones y que está presente en la mente de las autoridades correspondientes que planean la seguridad de las estructuras hidráulicas y que quisieran que en el futuro se estuviera protegiendo contra tales eventos. Las tormentas diseño de duración de 24 y de 6 horas del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) son ejemplos de tormentas diseño sintéticas (Chow *et al.*, 1988).

En los modelos lluvia-escorrentamiento es muy común que se reproduzcan eventos únicos y continuos, con duraciones menores o iguales a 24 horas. El análisis de la respuesta hidrológica de ambos eventos, únicos y continuos, son de gran importancia. Sin embargo, al momento de diseñar drenajes parcelarios y urbanos, al realizar el tránsito de avenidas a través de presas de almacenamiento y sus respectivos vertedores y al revisar el funcionamiento de bordos de protección contra inundaciones, es muy importante verificar su funcionamiento bajo la presencia de eventos extremos únicos. También el conocimiento de cómo se distribuye una tormenta en el tiempo es útil para estudiar la erosión del suelo y el potencial de producir inundaciones de varias tormentas. Es decir, en tales diseños y estudios es necesario contar con hietogramas de tormentas con duraciones menores o iguales a 24 horas. En México, y en muchos países, es común que los únicos registros de lluvia con registros históricos de varios años, sean de duración de 24 horas (Campos, 1998), lo que lleva a plantearse la pregunta de cómo obtener un hietograma que distribuya a nivel de horas y/o minutos tal tormenta (Yen and Chow, 1980).

Existen varios trabajos científicos alrededor del mundo que han estudiado la distribución temporal de eventos extremos que son usados para estimar su correspondiente avenida o caudal diseño (Huff, 1967; SCS, 1986; Chow *et*

al., 1988; Prodanovic and Simonovic, 2004); sin embargo uno de los más populares es el del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos (Chow *et al.*, 1988; Bedient *et al.*, 2013), incluso tales tormentas diseño sintéticas son consideradas en software clásico de Hidrología Superficial como el HEC-HMS (USACE, 2010), y aún en México, entre los consultores de la CONAGUA. Ese método fue desarrollado para Estados Unidos y considera que hay cuatro tipos de tormenta distribuidos de acuerdo a la parte del país en que se encuentren, pero en general, este patrón de distribución está en acorde a si están en zonas costeras del Pacífico o del Atlántico, o si se encuentran en tierra adentro. En este trabajo se pretende revisar varias tormentas que se registraron a detalle con pluviógrafo establecidos en la Costa de Chiapas; se verificará qué tanto, dichas tormentas se ajustan a los tipos de tormenta del SCS, con la finalidad de fijar una postura sobre el uso de tales patrones en el diseño de las estructuras hidráulicas Mexicanas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la zona de estudio

Los sitios de monitoreo seleccionados se ubican dentro de tres cuencas ubicadas en la Costa de Chiapas: Huehuetán, Huixtla y Coatán; las tres desembocan en el Océano Pacífico. Los seis sitios seleccionados son: Rosita, Finca Argovia, Santa Rita, Dos Hermanos, UNACH y Vega de los Gatos (Figura 1). El Cuadro 1 presenta características generales de los sitios monitoreados donde se instalaron los pluviógrafos y también muestra las lluvias anuales registradas durante el 2005 y el 2011. Observar que en promedio, en la zona de estudio, en el 2005 se registró una lluvia total anual de 4,459 mm y en el 2011 de 3,580 mm; cabe mencionar que la precipitación se concentra en aproximadamente un 97 % en los meses de abril a octubre (IMTA, 2009).

Materiales

Pluviogramas: Rollos de papel milimétrico con información de fecha, hora y magnitud de la tormenta registrada a partir del pluviógrafo tipo Hellman marca Thies de importación Alemana, el cual consiste en un sistema de relojería que gira un rollo de papel para 30 días, una probeta graduada a 10 cm de altura (cada cm representa 1 mm) la cual contiene un flotador que está conectado a la plumilla la cual se arrastra sobre el rollo de papel.

Tablet PC marca ASUS; Modelo ASUS ee slate para digitalizar los pluviogramas.

Programa de cómputo para procesar los pluviogramas desarrollado por el Instituto de Ingeniería Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo (CONAGUA, 2011). Los pluviogramas son digitalizados en la tableta mencionada anteriormente y el programa da como salida los datos digitales de lectura del pluviograma en formato Excel permitiendo construir los diversos hietogramas requeridos.



FIGURA 1. Localización de los seis sitios monitoreados.

CUADRO 1. Características generales de los sitios bajo estudio donde se ubicaron los pluviógrafos.

Sitio	Latitud Norte	Longitud Oeste	Elevación (m.s.n.m)	Precipitación 2005 (mm)	Precipitación 2011 (mm)
Rosita	15° 09' 50"	92° 25' 54"	116	4410	2954
Argovia	15° 07' 33"	92° 18' 12"	584	4942	4040
Santa Rita	15° 06' 00"	92° 18' 24"	580	ND	3939
Dos hermanos	15° 00' 43"	92° 22' 51"	74	3648*	2719
UNACH	15° 00' 31"	92° 23' 26"	42	3648*	ND
Vega de los Gatos	15° 01' 32"	92° 14' 15"	471	4835	4248
Promedio				4459	3580

ND = No Disponible; * Se tomó la precipitación anual de la estación 7075 Huehuetán del Servicio Meteorológico Nacional

Recopilación y análisis de los pluviogramas obtenidos y selección de los eventos extremos

En los seis sitios seleccionados, los pluviógrafos registraron la información correspondiente para los años 2005 y 2011. Se dio seguimiento a los meses en los cuales se concentra la mayor lámina de lluvia.

Cabe señalar, que el sitio UNACH, solo estuvo registrando en el 2005, la tormenta del Huracán Stan (CONAGUA, 2006). Dicho sitio era administrado por la Universidad de

Ciencias y Artes de Chiapas y después dejó de operar. Como consecuencia de la valiosa información registrada por los pluviogramas del 2005 en los sitios Argovia y UNACH, en el 2009 tomó fuerza la propuesta de instrumentar con pluviógrafo otros sitios como Santa Rita, Rosita y Vega de los Gatos, por lo que en el 2011 estos ya operaban eficientemente (CONAGUA, 2011).

Una vez teniendo los pluviogramas de cada sitio se analizaron los eventos ocurridos durante el registro de cada rollo (1 mes) y se seleccionaron eventos intensos y extremos, es

decir aquellos eventos de lluvia más críticos que pueden comprometer el funcionamiento de las estructuras de drenaje. Este proceso se llevó a cabo para los años 2005 y 2011, aunque el huracán Stán en octubre del 2005, que causó severas inundaciones y destrucción, fue un evento de referencia en cuanto a definir lo que se considera una tormenta extrema.

Procesamiento de los pluviogramas

Se procesaron los eventos seleccionados de los pluviogramas, para obtener con esto las láminas precipitadas de cada tormenta en intervalos diferentes de tiempo, con duraciones de 6 y 24 horas, además de eventos seleccionados de 5, 4, 3, 2 y 1 hora. Se procesó en EXCEL la información de incrementos del tiempo en minutos y de la lámina en mm, así como la lluvia acumulada en mm y su intensidad en mm/h. La intensidad máxima es la mayor pendiente observada para una tormenta, según la Ecuación (1):

$$i = \frac{P}{t} \quad (1)$$

Donde: i Intensidad de precipitación, en mm/h; P Precipitación total observada, en mm; t tiempo de precipitación, en horas.

Aplicación del método del SCS

Para analizar la tormenta diseño el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos (NRCS), antiguo Servicio de Conservación de Suelos (SCS), propone cuatro patrones adimensionales de lluvia acumulada o curva masa, para un periodo de 24 horas como se observa en la Figura 2, que recogen las distribuciones temporales de lluvias extremas más frecuentes en todo el territorio norteamericano como se muestra en la Figura 3 (Chow *et al.*, 1988).

Conocido el tipo de tormenta para una localidad determinada y la lámina total para una tormenta de diseño de 24 horas (P_{24}) con un periodo de retorno determinado, se distribuye esa lámina de lluvia de acuerdo a la curva tipo elegida, multiplicando la lámina total de la tormenta por

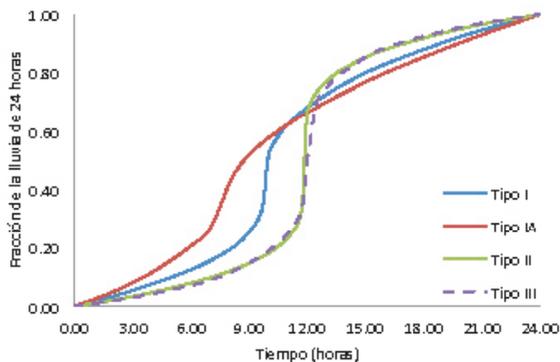


FIGURA 2. Lluvia acumulada en 24 horas del Servicio de Conservación de Suelos.

el valor leído en el eje de las ordenadas (P/P_{24}) para cada tiempo (eje de las abscisas). El Cuadro 2, muestra las coordenadas de las curvas de la Figura 2 (tomadas de Chow *et al.*, 1988). El Cuadro 2 también muestra la propuesta de las coordenadas de una tormenta de duración de 6 horas.

De acuerdo a los trabajos de investigación del SCS, la tormenta tipo III es típica de zonas expuestas a huracanes (Figura 3). La zona de la Florida (al Norte del Golfo de México) y el Atlántico Norte son ejemplos de lugares donde se presenta la tormenta tipo III. Por esa razón, para la Costa de Chiapas, México, que se encuentra en el Pacífico Sur, dicha tormenta tipo III es la que pudiera reproducir el patrón temporal de la lluvia en 24 horas. Las tormentas tipo I del Océano Pacífico de Estados Unidos, no aplican para México, ya que el Pacífico Mexicano, a diferencia del Pacífico de Estados Unidos, es una zona con abundante presencia de huracanes. El SCS solamente propuso una distribución temporal crítica de la lluvia en 6 horas, independientemente de la ubicación de la zona de estudio. La Figura 4, muestra el hietograma propuesto por el SCS para una lluvia de 6 horas; La Figura 5 muestra el hietograma de duración de 24 horas para las tormentas tipo III. Note que la tormenta diseño de 6 horas, parece seguir un patrón de distribución temporal aleatorio; sin embargo, en el caso de la tormenta tipo III de 24 horas, las alturas de lluvia más grandes se encuentran en el centro de la duración, es decir alrededor de las 12 horas. Observando la Figura 5, se interpreta que al principio la tormenta inicia suave, y después se presentan grandes láminas que inevitablemente y muy probablemente se conviertan en escurrimientos poniendo a prueba el funcionamiento de estructuras hidráulicas tan importantes como lo es el vertedor de una presa de almacenamiento. Obviamente, que si falla el vertedor, la seguridad de la presa se ve comprometida.

Comparación estadística

Se realizó una comparación estadística para poder valorar el ajuste de las tormentas reales al método del SCS con el fin de concluir si dichas tormentas del SCS realmente describen el comportamiento de las tormentas críticas en la Costa de Chiapas, México.



FIGURA 3. Localización de los tipos de tormenta en los Estados Unidos para la aplicación de los hietogramas de lluvia de 24 horas del SCS.

CUADRO 2. Distribución, en la escala del tiempo, de la lluvia según los tipos de tormenta del Servicio de Conservación de Suelos.

Tormenta de 24 horas						Tormenta de 6 horas		
Hora t	i/24	P_t/P_{24}				Hora t	t/6	P_t/P_6
		Tipo I	Tipo IA	Tipo II	Tipo III			
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00
2.00	0.083	0.035	0.050	0.022	0.020	0.60	0.10	0.04
4.00	0.167	0.076	0.116	0.048	0.043	1.20	0.20	0.10
6.00	0.250	0.125	0.206	0.080	0.072	1.50	0.25	0.14
7.00	0.292	0.156	0.268	0.098	0.089	1.80	0.30	0.19
8.00	0.333	0.194	0.425	0.120	0.115	2.10	0.35	0.31
8.50	0.354	0.219	0.480	0.133	0.130	2.28	0.38	0.44
9.00	0.375	0.254	0.520	0.147	0.148	2.40	0.40	0.53
9.50	0.396	0.303	0.550	0.163	0.167	2.52	0.42	0.60
9.75	0.406	0.362	0.564	0.172	0.178	2.64	0.44	0.63
10.00	0.417	0.515	0.577	0.181	0.189	2.76	0.46	0.66
10.50	0.438	0.583	0.601	0.204	0.216	3.00	0.50	0.70
11.00	0.459	0.624	0.624	0.235	0.250	3.30	0.55	0.75
11.50	0.479	0.654	0.645	0.283	0.298	3.60	0.60	0.79
11.75	0.489	0.669	0.655	0.357	0.339	3.90	0.65	0.83
12.00	0.500	0.682	0.664	0.663	0.500	4.20	0.70	0.86
12.50	0.521	0.706	0.683	0.735	0.702	4.50	0.75	0.89
13.00	0.542	0.727	0.701	0.772	0.751	4.80	0.80	0.91
13.50	0.563	0.748	0.719	0.799	0.785	5.40	0.90	0.96
14.00	0.583	0.767	0.736	0.820	0.811	6.00	1.00	1.00
16.00	0.667	0.830	0.800	0.880	0.886			
20.00	0.833	0.926	0.906	0.952	0.957			
24.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000			

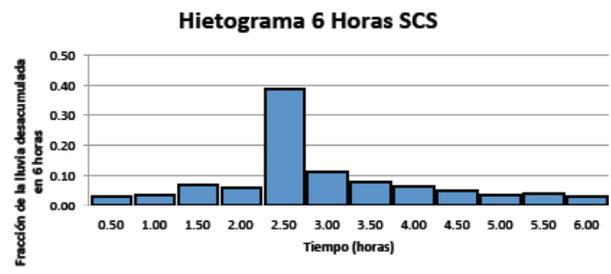


FIGURA 4. Tormenta diseño para una duración de 6 horas propuesta por el SCS.

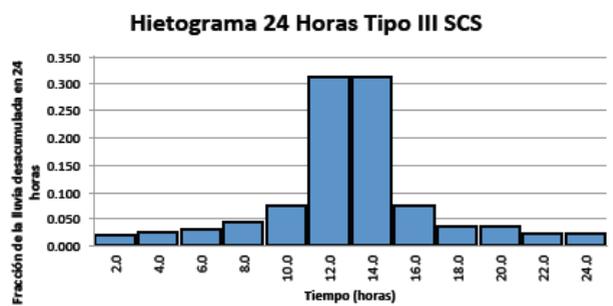


FIGURA 5. Tormenta diseño tipo III para una duración de 24 horas propuesta por el SCS.

La comparación estadística se hizo usando el criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe, el Error Relativo y el Error Medio Cuadrático.

Eficiencia de Nash-Sutcliffe

El estadístico de eficiencia entre los datos observados y los estimados es el criterio de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (1970), que compara los valores observados y simulados, el cual se calcula usando la Ecuación 2.

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_m)^2} \quad (2)$$

Donde: E , Eficiencia de Nash-Sutcliffe, adimensional; Q_o^t , valor observado en el tiempo t ; \bar{Q}_o , valor medio observado; Q_m^t , valor que estima el modelo en el tiempo, t ; T es la duración total de la tormenta.

La eficiencia de Nash puede ir desde $-\infty$ a 1. Una eficiencia de 1 corresponde a una combinación perfecta de los datos medidos con los datos observados, una eficiencia de 0 indica que las predicciones del modelo son tan precisas como la media de los datos observados, mientras que una eficiencia menor a 0 se produce cuando la media observada es un mejor estimador que las predicciones del modelo (Nash & Sutcliffe, 1970).

Error Relativo

Alonso (2013) menciona que uno de los estadísticos de comparación empleados en Hidrología es el Error Relativo (ER) el cual se calcula como:

$$ER = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i)^2} \right) * 100 \tag{3}$$

Donde: ER Error Relativo, en %; O_i Valor observado; E_i Valor estimado; y n es el número total de valores comparados.

Error Medio Cuadrático

Alonso (2013) menciona que otro de los estadísticos de comparación empleados en la modelación hidrológica es la Raíz Cuadrada del Cuadrado Medio del Error (RCCME) o también conocido como Error Medio Cuadrático (EMC) el cual se calcula como:

$$RCCME = \sqrt{\frac{Sr}{n-1}} \tag{4}$$

Donde: Sr es la suma de los cuadrados de los residuos entre los datos de tablas o estimados y los calculados u observados :

$$Sr = \sum (O_i - E_i)^2 \tag{5}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tormentas analizadas con 24 horas de duración

Se analizaron siete eventos con duración de 24 horas, uno de ellos ocurrió en el sitio Argovia en 2011 y los seis restantes corresponden al Huracán Stan que se presentó en 2005 en la Costa de Chiapas. En el Cuadro 3 se muestra un ejemplo de cálculo para una tormenta de 24 horas, ocurrida en Finca Argovia, el 3 de octubre del 2005; cabe señalar que este evento fue el que tuvo el mejor ajuste del total de las tormentas con duración de 24 horas.

Al dibujar estos valores las curvas obtenidas quedaron como se muestra en la Figura 6. Se puede observar que de la mitad del evento hasta la parte final la curva el SCS sobrestima un poco los valores de la tormenta real, aunque no afectó mucho al hacer el análisis, ya que éste se hizo para todo el evento.

Para la tormenta del 03 de octubre de 2005 del sitio Argovia la distribución propuesta por el SCS como evento individual se ajustó bien y dentro de los rangos manejados por los métodos estadísticos usados para la comparación, con base en los valores encontrados; $E= 0.89$, $ER = 3.85 \%$ y $EMC= 31.53 \text{ mm}$ (9.26 %).

De las tormentas analizadas con duración de 24 horas se observa con base en los rangos establecidos y los valores

CUADRO 3. Valores obtenidos de la tormenta del 03/10/05, la observada y la propuesta por el SCS con duración de 24 horas del sitio Argovia.

Tiempo (horas)	Pluviograma	Servicio de Conservación de Suelos	
	Lámina acumulada (mm)	Tormenta Tipo III	Lámina acumulada (mm)
0.00	0.00	0.000	0.000
2.00	15.65	0.020	6.809
4.00	26.40	0.043	14.638
6.00	27.40	0.072	24.511
7.00	30.10	0.089	30.298
8.00	46.00	0.115	39.149
8.50	53.55	0.130	44.256
9.00	62.05	0.148	50.384
9.50	67.35	0.167	56.852
9.75	68.30	0.178	60.597
10.00	72.75	0.189	64.341
10.50	91.35	0.216	73.533
11.00	111.45	0.250	85.108
11.50	134.25	0.298	101.448
11.75	149.70	0.339	115.406
12.00	162.65	0.500	170.215
12.50	183.85	0.702	238.982
13.00	199.55	0.751	255.663
13.50	212.25	0.785	267.238
14.00	220.55	0.811	276.089
16.00	241.15	0.886	301.621
20.00	296.38	0.957	325.792
24.00	340.43	1.000	340.430

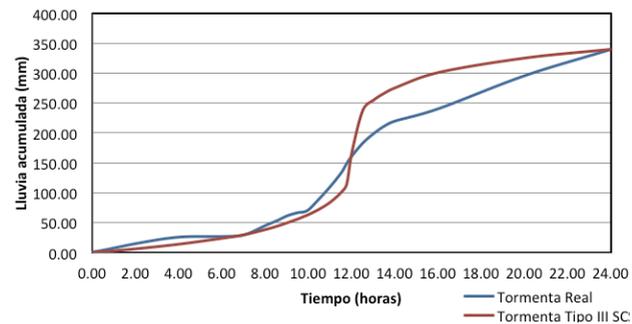


FIGURA 6. Tormenta de 24 horas del sitio Argovia del 3 de octubre del 2005 comparada con la del SCS.

obtenidos de los estadísticos de comparación (Cuadro 4), que la distribución propuesta por el SCS se ajustó bien a las tormentas observadas, cabe mencionar que el huracán Stan de octubre del 2005 hizo ocurrir eventos críticos muy buenos para este tipo de análisis por ser eventos extremos

CUADRO 4. Resultados de la comparación estadística para las tormentas de 24 horas observadas y el modelo tipo II del SCS.

Sitio	Fecha	Lámina total (mm)	I30 (mm/h)	Eficiencia de Nash-Sutcliffe	Error Relativo (%)	Error Medio Cuadrático (mm)
Vega de los Gatos	11/10/2011	73.30	26.40	0.76	5.87	9.95
UNACH	03/10/2005	337.83	63.80	0.84	5.88	36.52
UNACH	04/10/2005	303.93	56.20	0.46	17.00	51.85
UNACH	06/10/2005	181.15	41.20	0.82	4.27	20.14
Argovia	03/10/2005	340.43	63.80	0.89	3.85	31.53
Argovia	04/10/2005	300.83	56.20	0.54	15.69	49.33
Argovia	06/10/2005	328.20	41.20	0.82	11.85	57.02

I30 = Intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos

que están en la mente de la población y de los planeadores como un evento de lluvia que causó inundaciones, destrucción y muerte. En el mismo Cuadro 4, de manera adicional se muestra el parámetro I30, que es la intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos, la cual es de importancia para calcular la posible pérdida del suelo originada por la lluvia.

Tormentas analizadas con 6 horas de duración

Se analizaron 32 eventos de duraciones de 6 horas, de los cuales 30 se registraron en el 2011 y 2 del 2005. Se analizaron más tormentas del 2011 porque era la información más abundante ya que se monitoreo de manera constante ese año, entre abril y noviembre. Del 2005, solamente se contaba con la información crítica al huracán Stan, registrada cuidadosamente durante un periodo de aproximadamente 10 días. Por otra parte, en la Costa de Chiapas, ocurren de manera recurrente tormentas convectivas de corta duración pero de gran intensidad. Cabe señalar, que cuando se diseña en Ingeniería Hidrológica una tormenta, de manera indistinta se intenta considerar a todas las tormentas, sin importar se originen por un huracán o por procesos convectivos locales; lo que importa es identificar los valores extremos de los eventos meteorológicos que comprometen la seguridad de las estructuras hidráulicas.

La Figura 7, muestra en particular una comparación entre una tormenta real de seis horas ocurrida en el sitio UNACH el 4 de octubre del 2005 y la propuesta del SCS. Se observa que la curva propuesta por el SCS tiene un ajuste muy bueno respecto a la real. Aunque también se observa que del inicio a la parte media del evento, el SCS subestima un poco los valores de la tormenta real, cosa que no afectó en el análisis estadístico al ser una comparación del evento completo; este evento en particular tuvo valores estadísticos de E= 0.98, ER= 0.31 % y EMC= 6.54 mm (3.71 %), lo cual confirma lo que se observa como un buen ajuste.

El Cuadro 5 resume la comparación estadística de las 32 tormentas de duración de 6 horas ocurridas en el 2005 y 2011 y analizadas en este trabajo. Como Ingeniero, al momento de decidir, basado en tales estadísticas, se revisan dos criterios importantes: la eficiencia de Nash-Sutcliffe (muy famosa en eventos hidrológicos) y el error relativo.

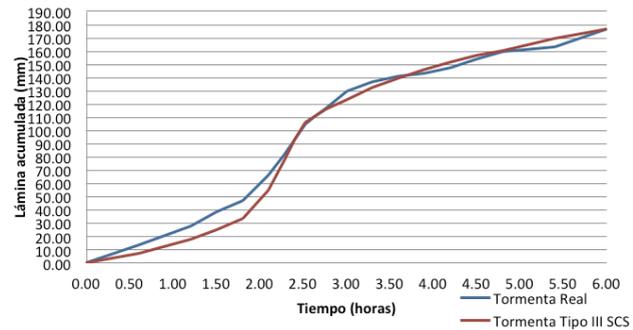


FIGURA 7. Tormenta del sitio UNACH del 4 de octubre del 2005 con duración de seis horas.

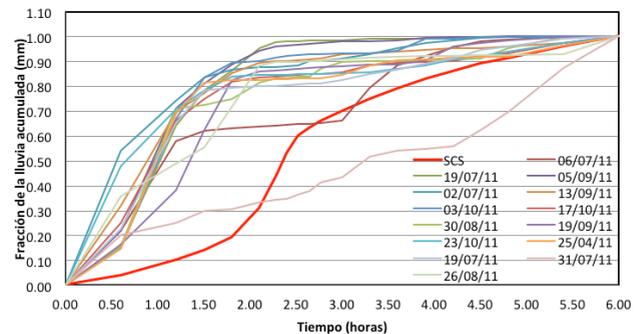


FIGURA 8. Tormentas de 6 horas en la Costa de Chiapas que no se ajustan al patrón del SCS.

Haciendo esas consideraciones estadísticas, de los 30 eventos, 15 no presentan un buen ajuste (Figura 8); 14 con Eficiencia de Nash negativa, y uno con error relativo del 29.66 %; aunque observe que en varios eventos donde Nash es negativo, el error relativo es de más del 10 %. Note que en aquéllos que Nash rechaza, el error relativo no excede el 17 %. Es decir, si el único criterio de elección fuera el error relativo, solo se rechazaría el evento del 7 de junio del 2011. Se observa, que es aceptable la propuesta del SCS para tormentas de 6 horas, porque notar que el evento tan extremo del huracán Stan del 2005 fue el que exhibió el mejor ajuste con la propuesta del SCS (Figura 7) con eficiencias de Nash cercanas a 1 y error relativo menor del 1 %. Sin embargo, en trabajos posteriores, sería valioso buscar ese patrón de

CUADRO 5. Resultados de la comparación estadística para las tormentas de 6 horas.

Sitio	Fecha	Lámina total (mm)	I30 (mm/h)	Eficiencia de Nash-Sutcliffe	Error Relativo (%)	Error Medio Cuadrático (mm)
Argovia	04/10/2005	164.35	63.80	0.95	0.80	10.18
UNACH	04/10/2005	176.3	89.20	0.98	0.31	6.54
Santa Rita	07/06/2011	132.10	123.40	0.41	29.66	39.14
Santa Rita	06/07/2011	149.30	111.78	-0.20	7.96	32.31
Santa Rita	10/07/2011	84.60	119.17	0.83	3.63	12.43
Santa Rita	18/07/2011	103.50	31.62	0.85	1.99	10.64
Santa Rita	19/07/2011	134.25	122.60	-2.58	16.39	50.44
Santa Rita	22/08/2011	80.75	54.60	0.33	7.78	18.63
Santa Rita	05/09/2011	106.10	94.67	-3.54	16.88	40.48
Santa Rita	19/09/2011	135.20	35.40	0.89	2.01	12.56
Dos Hermanos	26/06/2011	73.80	47.80	0.78	7.32	11.61
Dos Hermanos	02/07/2011	42.10	25.47	-10.98	16.77	15.55
Dos Hermanos	14/07/2011	41.30	29.40	0.94	1.88	3.83
Dos Hermanos	13/09/2011	100.90	90.65	-4.57	15.51	35.26
Dos Hermanos	03/10/2011	45.80	46.34	-2.61	15.81	16.49
Dos Hermanos	17/10/2011	42.80	29.84	-3.06	13.67	13.37
Dos Hermanos	18/10/2011	100.00	38.91	0.64	3.24	12.80
Rosita	14/08/2011	76.00	29.09	0.85	2.50	9.21
Rosita	30/08/2011	70.00	75.08	-1.98	12.93	21.29
Rosita	13/09/2011	66.50	54.80	0.92	1.73	6.55
Rosita	17/09/2011	48.55	46.00	0.55	9.11	9.12
Rosita	19/09/2011	161.55	125.40	-0.90	11.52	46.61
Rosita	25/09/2011	71.95	72.80	0.31	7.66	16.80
Rosita	23/10/2011	55.30	50.15	-8.65	15.39	18.49
Vega de los Gatos	25/04/2011	42.80	43.80	-2.31	14.01	13.51
Vega de los Gatos	28/05/2015	49.10	41.30	0.57	5.01	8.05
Vega de los Gatos	26/06/2015	137.90	47.47	0.83	2.23	13.97
Vega de los Gatos	04/07/2011	59.60	50.53	0.23	9.64	15.96
Vega de los Gatos	19/07/2011	70.90	55.16	-2.41	12.89	21.18
Vega de los Gatos	31/07/2011	70.10	26.83	-0.01	15.73	14.35
Vega de los Gatos	26/08/2011	61.45	31.83	-2.06	12.26	18.30
Vega de los Gatos	12/09/2011	54.00	16.62	0.75	2.82	6.01

tormentas alternativo de 6 horas. En un trabajo previo en el que se analizaron los patrones de la distribución de la lluvia para tormentas de 2, 6, 24 y 48 horas para zonas de Arabia, la propuesta del SCS para tormentas de 6 horas no se ajustó (Al-Rawas and Valeo, 2009). Por otra parte, en el mismo trabajo, la mayor parte de las tormentas eran convectivas y se concentraban en duraciones igual o menor a dos horas.

CONCLUSIONES

De los siete eventos extremos de 24 horas de duración analizados, se encontraron las siguientes tendencias: coeficientes de Nash entre 0.46 y 0.89, Errores Relativos entre 3.85 y 17 %; por lo tanto, el patrón de distribución Tipo III que propone el Servicio de Conservación de Suelos, tuvo un buen ajuste con las tormentas de 24 horas de duración para la Costa de Chiapas.

De las tormentas de 6 horas de duración, un 50 % de ellas no se ajustó al patrón propuesto por el SCS, para el evento más extremo e intenso de 6 horas presentado durante el huracán Stan se tuvo un ajuste cuantitativo casi perfecto, coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0.98 y Error Relativo menor del 1 %. Por lo que si lo que se quiere es que las estructuras hidráulicas soporten un evento tan extremo como el huracán Stan, no obstante, que la propuesta no se ajusta totalmente a los eventos, sigue siendo una buena metodología la del SCS.

A partir de las tormentas ajustadas se concluye que la distribución de tormenta del SCS Tipo III se puede aplicar de manera confiable a la Costa de Chiapas, en aquellos lugares donde no existan datos de pluviógrafos, tomando en cuenta que para duraciones de 24 horas hay más confianza que para las de 6 horas.

Al juntar en una sola gráfica los eventos de 6 horas de duración ajustados y no ajustados, se encontró que las curvas de las fracciones de la mayoría de las tormentas sin buen ajuste tuvieron un patrón de distribución similar entre ellos. Se recomienda, en trabajos posteriores, enfocarse a analizar y proponer un patrón de distribución alternativo y/o complementario al del SCS de 6 horas.

El comportamiento de los eventos de 6 horas que no se ajustaron fue muy similar entre sí, ya que la mayor parte de la tormenta se distribuyó en las 2 y 3 primeras horas y después la intensidad disminuyó considerablemente. Las tormentas de duraciones de 2 a 3 horas, no están consideradas como críticas dentro del SCS y se encuentran como casos particulares en la Costa de Chiapas, ya que al analizar los eventos había muchos de duraciones de 2 y 3 horas. Aunque en general, los eventos menores a 6 horas, exhibían un patrón de distribución triangular.

En este trabajo solo se analizaron algunos eventos extremos de duraciones de 6 y 24 horas para los años 2005 y

2011, pero lo correcto sería incluir mucho más años. Sin embargo, no hay datos disponibles en las partes medias y altas de la Costa de Chiapas que es donde más llueve. El único pluviógrafo disponible está en Tapachula, ya en la parte baja de las cuencas.

LITERATURA CITADA

- Alonso, S. H. 2013. Relación Lluvia-Escorrentamiento en la Cuenca del Río Coatán, Chiapas, México. Tesis Doctoral, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua: Universidad Autónoma Chapingo. 103 p.
- Al-Rawas, G. A.; Valeo, C. 2009. Characteristics of rainstorm temporal distribution in arid mountains and coastal regions. *Journal of Hydrology*. 376 (1): 318-326.
- Aparicio, M. F. J. 2011. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Ed. LIMUSA, México. 303 p.
- Bedient P. B.; Huber W.C; Vieux B. E. 2013. Hydrology and Floodplain Analysis. 5th ed. Prentice Hall, New Jersey. 801 p.
- Campos A. D. 1998. Proceso del Ciclo Hidrológico. Editorial Universitaria Potosina. San Luis Potosí, México. 900 p.
- Chow V. T.; Maidment D. R.; Mays L. W. 1988. Applied Hydrology. McGraw Hill. 572 p.
- CONAGUA. 2006. Evaluación de los Efectos del Cambio de cobertura y Uso de Suelo en la Erosión Hídrica y las relaciones precipitación-escorrentamiento en las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, del Estado de Chiapas. Núm. SGIH-FS-CHS-06-TT-193-RF-CC. Convenio entre la Comisión Nacional del Agua y la Universidad Autónoma Chapingo. 250 p.
- CONAGUA. 2011. Informe Final: Monitoreo de procesos hidrológicos erosivos en las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, Costa de Chiapas. México: Convenio entre la Comisión Nacional del Agua y la Universidad Autónoma Chapingo. 300 p.
- Huff F. A. 1967. Time Distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research*, 3 (4): 1007-1079.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA. 2009. Extractor Rápido de Información Climatológica, Versión III.2. Base de datos Digital.
- Instituto de Ingeniería Agrícola. 2011. Informe final del proyecto de monitoreo hidrometeorológico de la Costa de Chiapas. Universidad Autónoma Chapingo. Convenio UACH-CONAGUA. 511 p.
- Levy B.; McCuen R. 1999. Assessment of storm duration for hydrologic design. *Journal of Hydrologic Engineering*. 4(3): 209-213. ASCE. U.S.A.
- Nash J. E.; Sutcliffe J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10:282-290.
- Prodanovic P.; Simonovic S. P. 2004. Generation of Synthetic Design Storm for the Upper Thames River Basin. The University of Western Ontario. Dept. of Civil Engr. Report No. 049. Canada. 21 p.
- Soil Conservation Service, SCS. 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55. US Department of Agriculture. 26 p.
- U.S. Army of Corps Engineers, USACE. 2010. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Versión 3.5 User's Manual. Hydrologic Engineers Center. USA. 318 p.
- Yen, B. C.; Chow V. T. 1980. Design hyetographs for small drainage structures. *Journal of the Hydraulics division, ASCE*. 106 (6): 1055-1076.