

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**OBTENCIÓN DE HIETOGRAMAS CORRESPONDIENTES A DIFERENTES
PERIODOS DE RETORNO**

Óscar Arturo Fuentes Mariles – Faustino de Luna Cruz

José Alberto Sánchez Cruz – Hipólito Lorenzo Morales Rodríguez

Instituto de Ingeniería UNAM, Universidad Nacional Autónoma de México, México

ofm@pumas.iingen.unam.mx – FLunaC@iingen.unam.mx

JSanchezC@iingen.unam.mx – HMoralesR@iingen.unam.mx

RESUMEN:

En este artículo se describe un procedimiento propuesto para obtener hietogramas de precipitación asociados a distintos periodos de retorno, a partir del análisis de los datos de lluvia diaria registrados en estaciones climatológicas ubicadas dentro de la cuenca baja del río Papaloapan del estado de Veracruz, México. Con el propósito de que la información generada pueda aprovecharse mediante modelos de parámetros distribuidos para la transformación de la precipitación en escurrimiento, la información puntual de la lluvia de los hietogramas en la ubicación de las estaciones climatológicas se transfiere sobre la región del espacio definido por el área total de la cuenca de estudio, mediante el empleo de técnicas de interpolación.

ABSTRACT:

This paper describes a proposed method for obtaining precipitation hietograms related to different return periods. It is utilizing daily rainfall data registered at weather stations located in the Papaloapan river watershed, Veracruz, Mexico. In order that the gained information can be applied in a distributed model for simulating rainfall-runoff processes, a method of statistical interpolation is used to estimate the rainfall depth all over the watershed area.

PALABRAS CLAVES: *hietogramas, parámetros distribuidos, interpolación.*

INTRODUCCIÓN

La precipitación que ocurre en una cuenca puede ser considerada como el estímulo que provoca el escurrimiento superficial sobre toda su área, para después dirigirse hacia su red de drenaje y finalmente llegar a su punto de salida; este flujo sobre el terreno depende de muchos factores, entre los que se cuentan las características geomorfológicas, condiciones de humedad y el grado de urbanización del terreno.

Cuando en un río se incrementa en poco tiempo la cantidad de agua que fluye en él, ya sea por el escurrimiento formado con precipitaciones intensas, por la liberación del agua al desaparecer las obstrucciones de cauces naturales o artificiales, las descargas de una presa o la acción de mareas, se dice que se ha producido una avenida. Por su ubicación geográfica y gran extensión de litorales, la República Mexicana se ve afectada frecuentemente por diversos fenómenos hidrometeorológicos que originan avenidas importantes que pueden provocar la pérdida de vidas humanas o fuertes daños materiales. Ante la necesidad de verificar el funcionamiento hidráulico de una cuenca sometida a los fenómenos de inundación por desbordamiento de cauces y lluvia en cuenca propia (acumulación de agua de lluvia en un determinado lugar o área geográfica), en este trabajo se describe un procedimiento para obtener hietogramas asociados a distintos periodos de retorno, correspondientes a los trenes de tormenta como los que frecuentemente se presentan en una región de interés.

CÁLCULO DE LÁMINAS DE PRECIPITACIÓN

El área de estudio correspondiente a la cuenca baja del río Papaloapan se subdividió en las subcuencas mostradas en la Figura 1. Los criterios para esta división consideran las características fisiográficas del terreno, la ubicación de lagunas como fronteras hidrológicas, así como la existencia de estaciones hidrométricas sobre las corrientes.



Figura 1.- Área de estudio y trazo de subcuencas

Tomando en cuenta la trayectoria de los flujos de los cauces principales respecto a la ubicación de las localidades que durante los eventos hidrometeorológicos del año 2010 resultaron afectadas de manera importante, como son Tlacotalpan y Cosamaloapan, se definieron las zonas 1 y 2, mostradas en la Figura 2. La zona 1 representa la región más baja de la cuenca del río Papaloapan, la que admite los escurrimientos de las partes más elevadas y los conduce hacia el mar, mientras que la zona 2 es la región definida por los flujos de la planicie lagunar.

La información de lluvias diarias registradas en las estaciones climatológicas de cada zona se obtuvo de la base de datos llamada CLICOM, y se identificaron aquellas cuyos registros simultáneos son particularmente amplios, esto debido a que en el análisis de las precipitaciones se hizo necesario tomar en cuenta la simultaneidad de eventos extremos en las diferentes localidades. La Figura 3 muestra la amplitud de los registros de las estaciones consideradas.

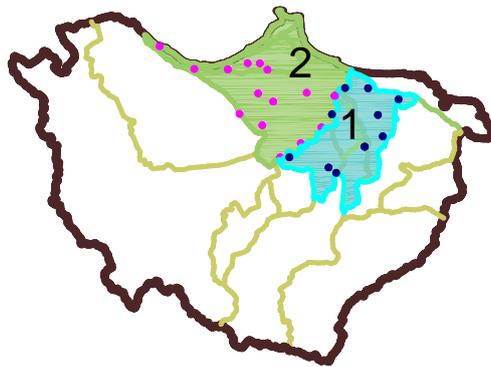


Figura 2.- Delimitación de zonas y estaciones climatológicas para el análisis de precipitación

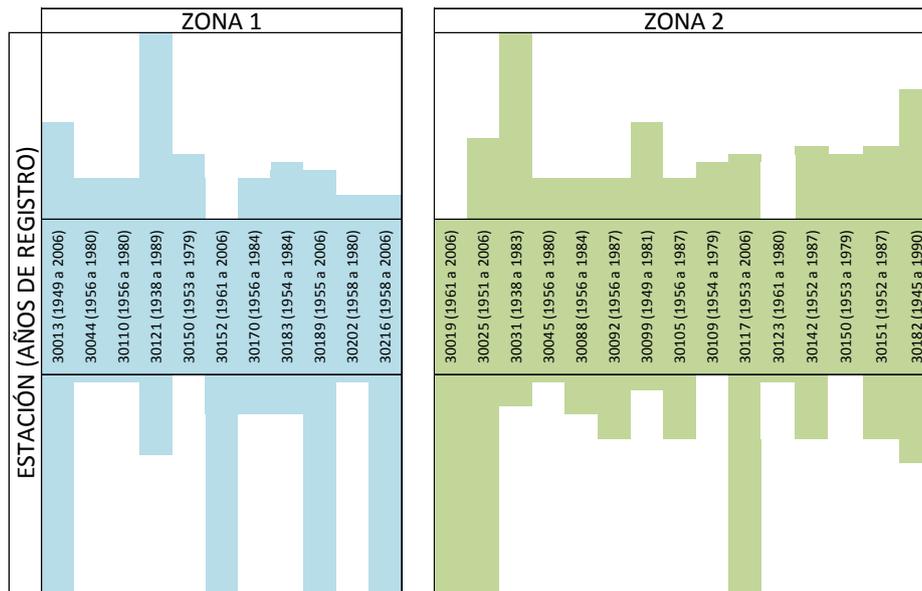


Figura 3.- Amplitud de registros de estaciones climatológicas en zonas 1 y 2

El comportamiento de la precipitación en la zona 1 se estudió en función de los registros de once estaciones, con periodo simultáneo del 1° de enero de 1961 al 31 de diciembre de 1979. Para la zona 2 se tomaron en cuenta quince estaciones, cuyos registros simultáneos también cubren el mismo periodo. El registro de la estación 30150 se utilizó para el análisis de ambas zonas, porque su ubicación coincide con el perímetro que define la separación de las dos regiones.

Para simular la evolución en el tiempo de las inundaciones por lluvia en cuenca propia se considera que estos fenómenos se desarrollan como consecuencia de varias tormentas, y por ello es conveniente que el resultado del análisis de la información, a manera de hietogramas, describa el comportamiento de la precipitación mediante trenes de tormenta de varios días consecutivos. Los datos se analizaron de modo que se construyeran hietogramas de 28 días de duración. En lo sucesivo se hará referencia a los cálculos correspondientes al registro de la estación climatológica 30117, Paraíso Novillero, ubicada en el Municipio de Cosamaloapan, dentro de la zona 2.

El procedimiento comienza con el cálculo de la máxima acumulación de lluvia durante cierto número de días; en este caso se encontró con un análisis espectral que era adecuado emplear veintiocho días consecutivos. Luego, para cada año registrado se obtiene el mayor valor promedio de lluvia diaria de los veintiocho días identificados. De manera semejante, se calculan los valores más grandes de lluvia promedio diaria de 27, 26, ..., 2 y 1 días consecutivos. Posteriormente, se realiza el cálculo de las láminas de lluvia acumulada de las precipitaciones promedio diarias obtenidas, de uno a veintiocho días consecutivos, y se procede al ajuste de estos datos mediante una distribución de probabilidad que se apegue de manera adecuada a su comportamiento. En este caso, con la distribución de probabilidad Gumbel se obtuvieron las láminas de lluvia acumulada por

trenes de tormenta para n días consecutivos, siendo $n = 1, 2, \dots, 28$, para los periodos de retorno de interés ($Tr = 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500$ y 1000 años). Estos resultados aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1.- Láminas de lluvia acumulada ajustadas para n días consecutivos (estación 30117), en mm

Tr	Número de días consecutivos de lluvia													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	106.9	136.7	159.3	175.5	192.9	209.3	225.6	238.8	251.1	261.7	271.4	281.7	295.4	310.3
5	143.3	183.4	208.4	231.6	252.2	270.1	286.6	302.9	318.8	330.4	342.3	355.1	371.7	391.5
10	167.4	214.3	240.8	268.8	291.5	310.4	327.0	345.3	363.6	375.9	389.2	403.7	422.2	445.3
20	190.5	243.9	272.0	304.4	329.1	349.0	365.7	386.0	406.6	419.6	434.1	450.3	470.6	496.9
50	220.4	282.3	312.4	350.6	377.9	399.0	415.9	438.7	462.3	476.1	492.4	510.6	533.3	563.7
100	242.9	311.0	342.6	385.1	414.4	436.5	453.4	478.2	504.0	518.5	536.0	555.8	580.2	613.8
200	265.2	339.7	372.7	419.6	450.8	473.8	490.9	517.5	545.6	560.7	579.5	600.8	627.0	663.7
500	294.7	377.4	412.5	465.0	498.9	523.1	540.3	569.4	600.4	616.3	636.8	660.2	688.8	729.5
1000	316.9	406.0	442.5	499.4	535.2	560.3	577.6	608.6	641.9	658.4	680.2	705.1	735.4	779.2

Tr	Número de días consecutivos de lluvia													
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
2	322.7	335.5	346.8	357.7	367.6	377.8	388.3	395.4	401.4	410.7	420.8	431.5	443.4	454.4
5	405.4	421.1	432.4	445.2	458.9	471.2	483.6	493.0	501.2	511.0	523.0	532.0	546.2	556.6
10	460.2	477.7	489.0	503.2	519.4	533.0	546.7	557.6	567.2	577.4	590.6	598.5	614.3	624.3
20	512.7	532.0	543.4	558.7	577.4	592.3	607.3	619.5	630.6	641.1	655.5	662.4	679.6	689.3
50	580.7	602.4	613.7	630.7	652.5	669.0	685.6	699.7	712.6	723.6	739.5	745.0	764.1	773.3
100	631.7	655.1	666.5	684.6	708.7	726.5	744.3	759.8	774.0	785.4	802.4	806.9	827.5	836.3
200	682.4	707.6	719.0	738.3	764.8	783.8	802.8	819.7	835.2	846.9	865.1	868.5	890.6	899.0
500	749.4	776.8	788.3	809.1	838.8	859.3	880.0	898.7	916.0	928.2	947.8	949.9	973.8	981.8
1000	800.0	829.2	840.7	862.7	894.6	916.5	938.3	958.5	977.1	989.5	1010.4	1011.4	1036.8	1044.3

DEFINICIÓN DE LA FORMA DE LOS HIETOGRAMAS

Para definir la forma de los hietogramas que dieron lugar a las precipitaciones de lluvia acumulada que aparecen en la Tabla 1, se llevó a cabo el cálculo de las láminas correspondientes a un día de lluvia (cálculo de la diferencia de las láminas acumuladas entre $n+1$ y n días consecutivos). Por ejemplo, para un periodo de retorno de 100 años de la estación 30117, las láminas de lluvia acumulada de tres y dos días son $h_3=342.6$ y $h_2=311.0$ mm, respectivamente. La diferencia, h_{3-2} , es igual a 31.6 mm, y representa una de las láminas de precipitación que conforman al tren de lluvias de 28 días del hietograma requerido. Con este procedimiento pueden obtenerse veintiocho láminas de lluvia para cada periodo de retorno. Los valores calculados para el periodo de retorno de 100 años ($Tr=100$) aparecen en la Tabla 2.

La asignación de un orden a las láminas del hietograma de 100 años de periodo de retorno se realizó tomando en cuenta la variación de la lluvia correspondiente al tren de precipitaciones de acumulación máxima de lluvia en veintiocho días consecutivos registrados en la estación 30117. Del registro histórico se observó que tales precipitaciones ocurrieron en 1993 (Tabla 3).

A cada lluvia histórica del periodo identificado se le asigna un número ordinario de acuerdo con su magnitud; por ejemplo, el orden uno le corresponde la precipitación de 95.2 mm, por ser la máxima. El orden dos se asigna a una de dos precipitaciones, las que se ubican justo antes y después de 95.2, y se elige 27.5 por ser la de mayor magnitud. El procedimiento continúa hasta completar el periodo de veintiocho días de interés. Así por ejemplo, la ordenada del día uno del hietograma de la estación 30117 es la vigésimo octava precipitación ajustada de la Tabla 2 (8.8 mm).

Tabla 2.- Láminas de un día de lluvia ajustadas a un periodo de retorno de 100 años (estación 30117)

Lámina	Altura de lámina [mm]	Lámina	Altura de lámina [mm]
h ₁	242.9	h ₁₅₋₁₄	17.9
h ₂₋₁	68.2	h ₁₆₋₁₅	23.4
h ₃₋₂	31.6	h ₁₇₋₁₆	11.4
h ₄₋₃	42.6	h ₁₈₋₁₇	18.1
h ₅₋₄	29.3	h ₁₉₋₁₈	24.2
h ₆₋₅	22.1	h ₂₀₋₁₉	17.7
h ₇₋₆	17.0	h ₂₁₋₂₀	17.9
h ₈₋₇	24.7	h ₂₂₋₂₁	15.5
h ₉₋₈	25.8	h ₂₃₋₂₂	14.2
h ₁₀₋₉	14.5	h ₂₄₋₂₃	11.4
h ₁₁₋₁₀	17.5	h ₂₅₋₂₄	17.0
h ₁₂₋₁₁	19.8	h ₂₆₋₂₅	4.5
h ₁₃₋₁₂	24.5	h ₂₇₋₂₆	20.6
h ₁₄₋₁₃	33.6	h ₂₈₋₂₇	8.8

Tabla 3.- Hietograma de mayor acumulación de lluvia histórico de 28 días (estación 30117)

08 Jun - 05 Jul (1993)	
Orden	h [mm]
28	15.0
27	0.0
⋮	⋮
3	10.5
1	95.2
2	27.5
4	5.0
⋮	⋮
24	46.2
25	9.2

Cabe señalar que la lámina de precipitación máxima del tren de lluvias histórico de veintiocho días de la estación 30117 ocurrió el décimo tercer día. Sin embargo, con la intención de que la información generada pueda implantarse con modelos lluvia-escurrimiento de parámetros distribuidos, para el análisis hidráulico de una cuenca bajo condiciones francamente desfavorables, se propuso que la lámina de lluvia más grande de los hietogramas correspondientes a la ubicación de cada estación climatológica considerada se presentara el décimo día, lo que implica su ocurrencia simultánea sobre el área total de estudio. Este reajuste de las precipitaciones no significa que se haya ignorado al tren de lluvias histórico de máxima precipitación de veintiocho días (orden definido en la Tabla 3), sino que el orden definitivo tomó en cuenta al conjunto de veintiocho lluvias consecutivas en las que el valor máximo se presentó justamente el décimo día. La Figura 4 es una representación gráfica del hietograma de la estación 30117.

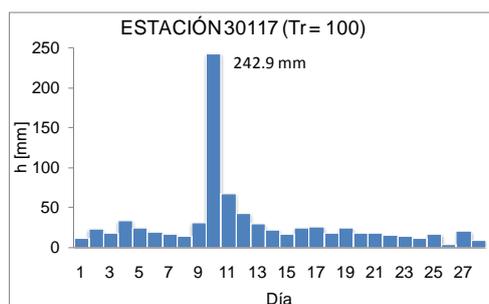


Figura 4.- Hietograma de la estación 30117, para un periodo de retorno de 100 años

SIMULTANEIDAD DE EVENTOS

En vista de que la probabilidad de ocurrencia simultánea de lluvias extraordinarias sobre la totalidad del área de una cuenca grande es baja, es de esperarse que los mayores escurrimientos se presenten, en un momento dado, únicamente sobre cierta región de la misma. Para tomar en cuenta esta condición se utiliza el concepto de estación virtual.

De cada zona de estudio (zonas 1 y 2 de la Figura 2) se generó un registro virtual de precipitaciones que consiste en la suma de las lluvias de los registros simultáneos de las estaciones climatológicas consideradas. Por ejemplo, para la zona 2, el registro virtual del día 1° de enero de 1961 es igual a la suma de los quince valores de precipitación correspondientes a los días primero de enero de 1961 de las quince estaciones climatológicas consideradas para el análisis de dicha zona.

Posteriormente se realiza, de cada zona, el análisis de la información de su registro virtual, obteniéndose las láminas de lluvia acumulada para veintiocho días consecutivos de precipitación, a las que se les ajustan diferentes funciones de distribuciones de probabilidad, con la intención de obtener precipitaciones acumuladas de veintiocho días, para los periodos de retorno de interés.

En la Tabla 4 se muestran las láminas de precipitación acumulada de veintiocho días consecutivos para diferentes periodos de retorno, de las estaciones seleccionadas para el análisis de ambas zonas, además de las correspondientes a sus estaciones virtuales respectivas. Se observa también un conjunto de factores de simultaneidad de eventos que corresponden a cada periodo de retorno de ajuste. Cada factor se obtiene como el cociente de la lámina acumulada ajustada del registro virtual y la suma de las láminas acumuladas ajustadas de las estaciones climatológicas correspondientes.

Los factores calculados se utilizan para obtener los valores definitivos de las láminas de los hietogramas en la ubicación de las estaciones climatológicas. Por ejemplo, la magnitud definitiva de las precipitaciones del hietograma de la estación 30117, con periodo de retorno de 100 años, se obtuvieron al multiplicar las láminas de lluvia de la Figura 4 por su factor de simultaneidad de eventos correspondiente, que para la zona 2 es igual a 0.695 unidades (Tabla 4). Con este procedimiento se asegura que los eventos representados por la estación virtual no se vean superados, pues se considera que físicamente esta condición representa la situación más desfavorable en la región de estudio. Las láminas que no habían sido afectadas por su factor de simultaneidad representaban situaciones de ocurrencia de eventos extraordinarios simultáneos sobre toda el área de estudio.

La Figura 5 muestra el hietograma de un tren de lluvias de veintiocho días, para un periodo de retorno de 100 años en la ubicación de la estación 30117. Este hietograma sí considera la simultaneidad de eventos extraordinarios de precipitación sobre la zona 2 de estudio, a diferencia del mostrado en la Figura 4.

El procedimiento descrito se practicó de tal forma que se obtuvieron los hietogramas para 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 años de periodo de retorno, en la ubicación de las estaciones climatológicas de las zonas 1 y 2 de la cuenca baja del río Papaloapan.

TRANSFERENCIA DE LA INFORMACIÓN PUNTUAL DE LA LLUVIA

En conocimiento de la lluvia puntual en la ubicación de las estaciones climatológicas, se procedió a la estimación de los eventos de precipitación sobre regiones en las que no existe registro de las variaciones que ha tomada esta variable a través del tiempo. Se utilizó la técnica de interpolación de Kriging, en la que se supone que la distancia entre puntos de muestreo es una expresión de la correlación espacial entre dichos puntos, y esta información es útil para explicar la variabilidad encontrada en la superficie muestreada, pues los resultados proveen estimaciones insesgadas y de varianza mínima. El modelo matemático empleado es el siguiente:

Tabla 4.- Láminas acumuladas de 28 días (mm), y factores de simultaneidad de eventos en zonas 1 y 2

ESTACIÓN (zona 1)	Tr=2	Tr=5	Tr=10	Tr=20	Tr=50	Tr=100	Tr=200	Tr=500	Tr=1000
30013	455.5	584.1	669.3	751.0	856.7	935.9	1014.9	1119.1	1197.8
30044	361.0	461.5	528.1	592.0	674.6	736.5	798.2	879.6	941.2
30110	384.9	519.5	608.6	694.0	804.7	887.6	970.2	1079.1	1161.5
30121	539.9	714.9	830.7	941.9	1085.8	1193.6	1301.0	1442.7	1549.8
30150	399.4	510.1	583.4	653.7	744.6	812.8	880.7	970.3	1038.1
30152	361.6	476.2	552.1	625.0	719.2	789.8	860.2	953.1	1023.2
30170	898.9	1127.5	1278.8	1424.0	1611.9	1752.7	1892.9	2078.0	2217.9
30183	503.8	650.6	747.7	840.9	961.6	1052.0	1142.0	1260.8	1350.6
30189	534.4	773.5	931.8	1083.6	1280.1	1427.3	1574.1	1767.6	1913.9
30202	380.8	526.2	622.5	714.8	834.4	923.9	1013.2	1130.9	1219.9
30216	496.0	754.5	925.6	1089.8	1302.3	1461.5	1620.2	1829.5	1987.7
Suma	5316.2	7098.5	8278.6	9410.5	10875.7	11973.6	13067.6	14510.8	15601.6
Virtual	4635.3	5592.0	6225.4	6832.9	7619.4	8208.7	8795.9	9570.6	10156.0
Factor	0.872	0.788	0.752	0.726	0.701	0.686	0.673	0.660	0.651

ESTACIÓN (zona 2)	Tr=2	Tr=5	Tr=10	Tr=20	Tr=50	Tr=100	Tr=200	Tr=500	Tr=1000
30019	409.5	512.0	579.8	644.9	729.1	792.3	855.2	938.1	1000.9
30025	573.0	718.5	814.9	907.4	1027.1	1116.7	1206.1	1324.0	1413.1
30031	419.2	669.2	834.6	993.4	1198.8	1352.8	1506.2	1708.6	1861.5
30045	383.8	524.3	617.3	706.6	822.1	908.6	994.9	1108.7	1194.6
30088	363.0	534.5	648.1	757.0	897.9	1003.6	1108.8	1247.7	1352.6
30092	447.7	571.9	654.1	733.0	835.1	911.6	987.8	1088.4	1164.4
30099	483.6	639.0	741.8	840.5	968.2	1063.8	1159.2	1285.0	1380.0
30105	434.6	591.4	695.2	794.7	923.6	1020.1	1116.3	1243.3	1339.2
30109	468.3	584.9	662.0	736.1	831.9	903.7	975.2	1069.6	1140.9
30117	454.4	556.6	624.3	689.3	773.3	836.3	899.0	981.8	1044.3
30123	339.3	472.2	560.2	644.6	753.8	835.7	917.3	1024.9	1106.2
30142	512.8	678.8	788.7	894.1	1030.6	1132.8	1234.7	1369.1	1470.7
30150	399.4	510.1	583.4	653.7	744.6	812.8	880.7	970.3	1038.1
30151	581.6	754.4	868.8	978.5	1120.6	1227.0	1333.1	1473.0	1578.8
30182	536.2	1070.3	1423.9	1763.1	2202.1	2531.1	2858.8	3291.3	3618.1
Suma	6806.5	9388.0	11097.1	12736.5	14858.6	16448.8	18033.2	20123.5	21703.3
Virtual	5988.0	7445.0	8409.6	9334.9	10532.6	11430.1	12324.3	13504.1	14395.8
Factor	0.880	0.793	0.758	0.733	0.709	0.695	0.683	0.671	0.663

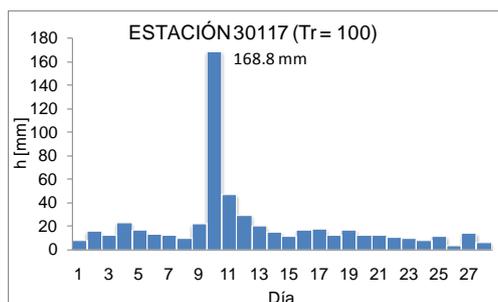


Figura 5.- Hietograma de la estación 30117, para un periodo de retorno de 100 años, considerando la simultaneidad de eventos extraordinarios en la zona 2

$$P_e = \sum_{j=1}^n W_j P_j \quad [1]$$

$$\sum_{j=1}^n W_j = 1 \quad [2]$$

$$[W_j] = [\gamma(d_{ij})]^{-1} [\gamma(d_{ej})] \quad [3]$$

$$\gamma(d_{ij}) = \frac{1}{2N} \sum [(P_i - \widehat{M}_i) - (P_j - \widehat{M}_j)]^2 \quad [4]$$

$$d_{ej} = \sqrt{(X_e - X_j)^2 + (Y_e - Y_j)^2} \quad [5]$$

donde P_e es la estimación de la lluvia en un punto de coordenadas $(X_e - X_j)$; W_j es el factor de peso de una estación de referencia en donde se conoce la magnitud de la precipitación; P_j es la precipitación en la estación j ; $\gamma(d_{ij})$ es el semivariograma calculado a partir de observaciones en las estaciones i y j , valores medios de estas series y tamaño de muestra común; d_{ij} y d_{ej} son las distancias entre estaciones de referencia y la estación de interés (Maidment, 1993).

En la Figura 6 se aprecia la posición relativa que guardan las estaciones climatológicas representativas de la zona 1 respecto a una malla de cuadrados, cada uno de 1500 m por lado. Este trazo se realizó con la intención de definir la ubicación geográfica de un conjunto de puntos sobre el espacio correspondiente a la zona 1.

Para efectuar el análisis hidráulico de la cuenca bajo precipitaciones asociadas a diferentes periodos de retorno, es necesario conocer la variación de la lluvia en periodos consecutivos de 28 días, es decir, sus hietogramas. La Figura 7 muestra la malla trazada para la identificación de puntos sobre el espacio antes referido como zona 2.

Con la técnica de interpolación de Kriging se obtuvieron las láminas de lluvia de los hietogramas correspondientes a los 384 puntos definidos por las intersecciones de la malla de la zona 1, así como los hietogramas de los 4402 puntos definidos por la malla de la zona 2. En las figuras 6 y 7 se aprecian, de cada zona, algunos hietogramas para diferentes periodos de retorno.

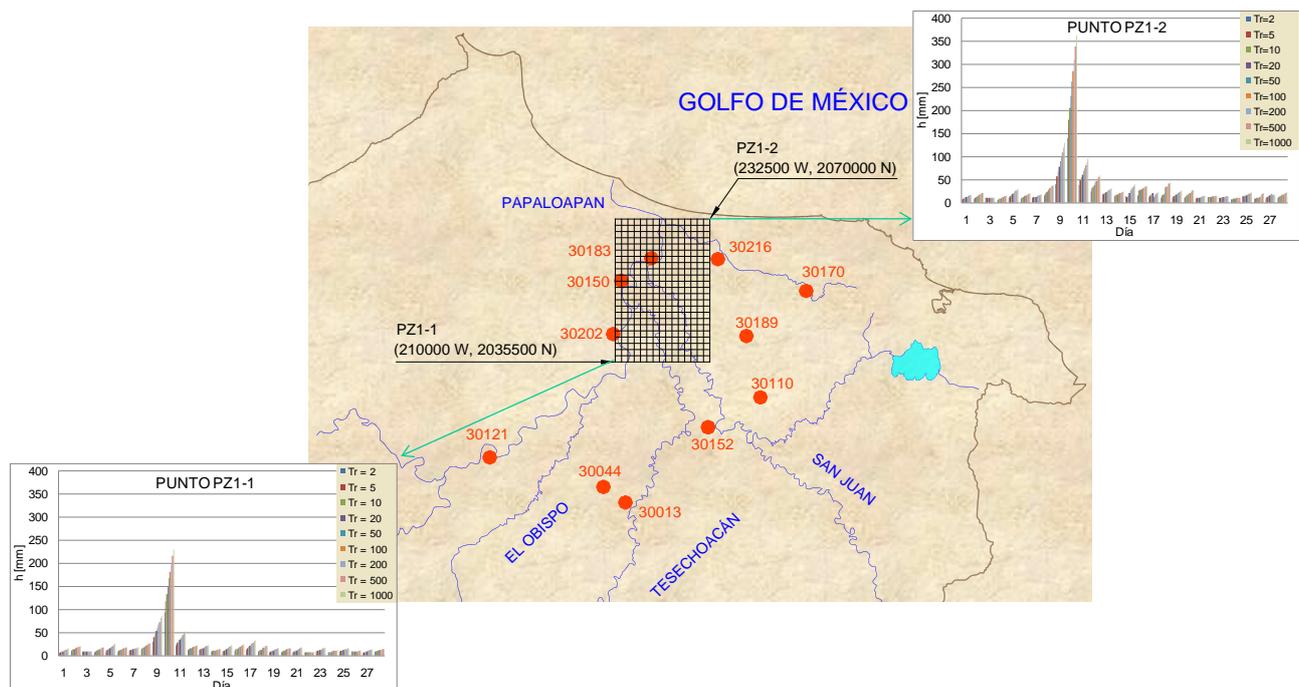


Figura 6.- Hietogramas de trenes de tormenta de 28 días en puntos interiores de la zona 1, para diferentes periodos de retorno. Malla de 384 elementos de 1500 m por lado

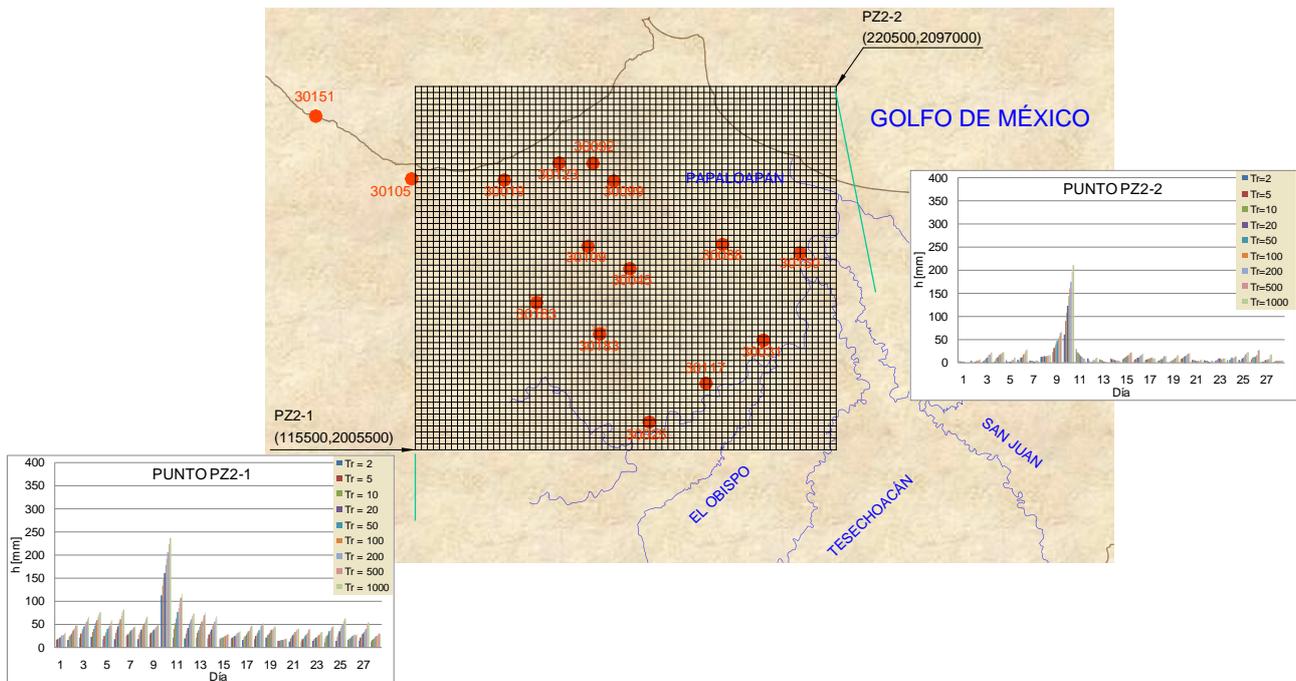


Figura 7.- Hietogramas de trenes de tormenta de 28 días en puntos interiores de la zona 2, para diferentes periodos de retorno. Malla de 4402 elementos de 1500 m por lado

HIETOGRAMAS PARA LÁMINAS DE PRECIPITACIÓN CON DURACIÓN MENOR A UN DÍA

Cada barra de los hietogramas de trenes de tormenta de 28 días calculados corresponde a la lluvia precipitada en un periodo de 24 horas continuas. Sin embargo, en el estado de Veracruz se ha observado que la duración de las lluvias más intensas es del orden de 8 horas, y por ello se procedió a calcular la variación de la lluvia acumulada durante un día, en un intervalo de tiempo menor.

Es necesario conocer el porcentaje de la lluvia total de 24 horas que se concentra en 1 hora. Tomando en cuenta que la lámina de 24 horas y 100 años de periodo de retorno en las estaciones climatológicas estudiadas es de aproximadamente 200 mm, se calculó la fracción que sobre esta lluvia representa la lámina máxima registrada en una hora en México (120 mm en el año 1997, durante el huracán Paulina), resultando ser del orden de 60%, lo que implica un factor de comportamiento K de 0.6.

La variación de la lluvia acumulada durante una tormenta se definió mediante el producto del factor K y los coeficientes propuestos por Chen (1983). Bajo este criterio, la tormenta de 8 horas de duración a considerar representa el 89.4% del total de la lluvia de un día. El porcentaje faltante (10.6%) corresponde a la lámina de precipitación que se presentó antes o después de las 8 horas en que se considera que está concentrada la mayor parte de la lluvia diaria. Con la información anterior y el procedimiento del bloque alterno para el acomodo de las barras de un hietograma, se precisó la forma del hietograma de 8 horas de duración de la Figura 8, que concentra la mayor parte de la lluvia de un día, a intervalos de 15 minutos, en unidades de mm/mm (Chow, 1994).

En la Figura 9 se presenta el hietograma de 8 horas de duración correspondiente a la precipitación del décimo día del tren de lluvias de 28 días de la estación 30117, para un periodo de retorno de 100 años. Este hietograma se obtiene al multiplicar 168.8 mm (precipitación del décimo día de la Figura 5) por las láminas de lluvia de la Figura 8.

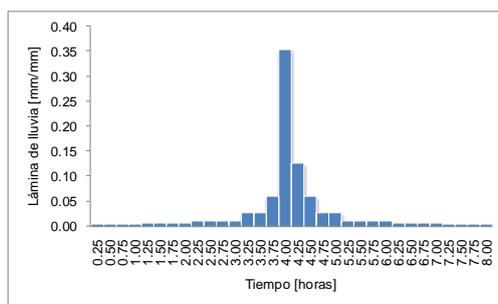


Figura 8.- Hietograma que define la distribución de la lluvia de 24 horas en un intervalo de 8 horas de precipitación en el área de estudio

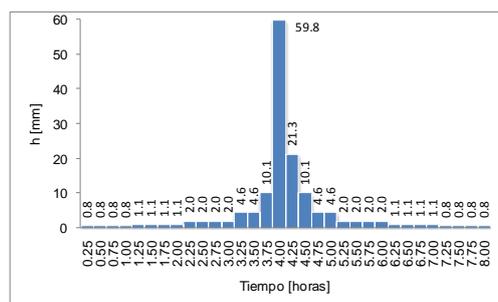


Figura 9.- Hietograma con periodo de retorno de 100 años en la estación 30117, correspondiente al décimo día del tren de lluvias de 28 días de análisis hidrológico

CONCLUSIONES

Se presentó una metodología detallada respecto al análisis de la información de lluvias diarias sobre una cuenca para el desarrollo de hietogramas de trenes de tormentas de varios días. Debido a que el producto final consiste en un conjunto de hietogramas tan grande como la magnitud del área de estudio lo requiera, y la variación de la lluvia se define en intervalos de tiempo menores a 24 horas, es posible aprovechar esta información para el análisis hidráulico de la cuenca mediante modelos de lluvia-escorrentamiento de parámetros distribuidos, no de parámetros concentrados que sólo consideren promedios espaciales de las características fisiográficas y de precipitación.

REFERENCIAS

- Chen, C. L.** (1983). "Rainfall Intensity-Duration-Frequency Formulas". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 12, December 1983, pp. 1603-1621.
- Chow, V. T.** (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana, S.A., Colombia.
- Maidment, D. R.** (1993). *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill Inc., USA.