

# RELACIÓN Y ESTIMACIÓN DE PREDICCIONES DE LLUVIA HORARIA-DIARIA EN DOS ZONAS GEOGRÁFICAS DE MÉXICO

• Daniel Francisco Campos-Aranda •  
*Profesor jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México*

## Resumen

Cuando no se dispone de registros hidrométricos, las crecientes de diseño se estiman a través de métodos hidrológicos, los cuales se basan en las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF). Tales curvas se pueden estimar —en sitios sin datos pluviográficos— con base en las predicciones de lluvia horaria y diaria. Para dos zonas geográficas disímiles de México, la primera semiárida y la segunda subhúmeda, se verificó que existe una relación lineal entre tales predicciones. Se indica cómo obtener la relación lineal regional, la cual conduce a predicciones de lluvia horaria más exactas, y por lo tanto se estiman curvas IDF más confiables, según el método expuesto basado en la fórmula de Chen.

**Palabras clave:** estaciones pluviográficas, lluvia máxima diaria anual, análisis probabilístico, fórmula de Chen.

## Introducción

El dimensionamiento y la revisión de la seguridad hidrológica de todas las obras hidráulicas se realiza con base en las avenidas o crecientes de diseño. La estimación más confiable de éstas se lleva a cabo por medio del análisis probabilístico de sus registros de gastos máximos anuales, cuyos resultados se denominan predicciones. En cuencas rurales sin datos hidrométricos y en las cuencas urbanas, la estimación de las crecientes de diseño se aborda a través de los llamados métodos hidrológicos, los cuales transforman las lluvias de diseño en las predicciones buscadas. En general, la estimación de tales lluvias de diseño requiere de las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF), las cuales engloban o sintetizan las características de las tormentas de la zona.

Las curvas IDF se construyen con base en los registros pluviográficos; la escasez de éstos conduce a procedimientos de estimación basados en fórmulas empíricas, por ejemplo la de Cheng-Lung Chen, cuyos datos básicos

son las predicciones de lluvia horaria y diaria, a partir de las cuales se definen los cocientes lluvia-duración ( $R$ ) y lluvia-frecuencia ( $F$ ), que caracterizan a las curvas IDF, y cuyo escalamiento lo define la lluvia de duración de una hora y periodo de retorno de diez años ( $P_1^{10}$ ).

En este trabajo se busca la relación entre las predicciones de lluvia horaria y de lluvia diaria, en dos zonas geográficas disímiles de México. Con base en tal relación, se demuestra que es confiable la estimación de las predicciones de lluvia horaria cuando se dispone sólo de registros pluviométricos. Por último, se indica cómo utilizar las predicciones horarias estimadas para establecer unas curvas IDF.

## Desarrollo

### *Zonas geográficas e información pluviográfica procesada*

La primera zona, llamada norte-centro, abarca básicamente la Región Hidrológica 36 (Nazas-Aguanaval), en la cual, de acuerdo

con el *Boletín Climatológico Núm. 4* (SARH, 1980), existen siete registros pluviográficos. Los de mayor amplitud son cuatro, cuyas características generales se presentan en el cuadro 1. Además se incluyó en esta zona al registro pluviográfico de Saltillo, Coahuila, que pertenece a la Región Hidrológica 24-3 (Bajo Río Bravo), por ello su registro está en el *Boletín Climatológico Núm. 6* (SARH, 1983), pero que por cercanía y similitud de clima es factible procesarlo con los de la región 36, para definir una zona de clima semiárido o seco.

La segunda zona se designó centro-este y corresponde a la porción baja de la extensa Región Hidrológica 26 (Pánuco). En esta región existen, de acuerdo con el *Boletín Climatológico*

*Núm. 5* (SARH, 1982), doce estaciones pluviográficas; las de mayor registro y que se localizan en la zona de clima cálido-húmedo son cuatro, cuyas características generales se tienen también en el cuadro 1.

Los registros pluviográficos procesados corresponden únicamente a las intensidades de una hora de duración, cuyas unidades originales son mm/h, pero en este lapso también equivalen sólo a milímetros (mm). Las estaciones pluviométricas utilizadas son las mismas que las pluviográficas, empleándose sólo el registro de lluvia máxima diaria anual disponible en los boletines climatológicos citados. Por lo general, este último resultó con más años de datos en comparación con los

Cuadro 1. Características generales de las estaciones pluviográficas y pluviométricas utilizadas.

Núm.	Pluviógrafo Pluviómetro	Estado	Coordenadas			Fórmula climática	Periodo de registro (años)	Valores observados (mm)	
			Latitud	Longitud	Altitud*			Mínimo	Máximo
1a	Presa El Palmito	Durango	25° 35'	104° 59'	1 550	BS <sub>0</sub> hw(w)(e)	1941-1978 (38)	10.1	57.6
							1939-1978 (40)	21.6	84.6
2a	Cañón Fernández	Durango	25° 15'	103° 47'	1 193	BWhw(w)(e')	1941-1978 (38)	6.1	60.5
							1941-1978 (38)	15.0	69.4
3a	Ciudad Lerdo	Durango	25° 32'	103° 32'	1 137	BWhw''(e)	1947-1978 (32)	6.3	50.9
							1921-1978 (56)	12.4	90.5
4a	Cazadero	Zacatecas	23° 42'	103° 06'	1 890	BS <sub>1</sub> kw(e)	1963-1978 (16)	15.3	43.1
							1958-1978 (21)	24.5	82.8
5a	Saltillo	Coahuila	25° 25'	101° 00'	1 589	BS <sub>0</sub> (h)hw''(e')	1939-1979 (21)	5.0	49.7
							1940-1980 (40)	16.5	84.0
1b	Ahualulco	Tamaulipas	22° 57'	99° 08'	100	Aw'' <sub>2</sub> (e)	1951-1979 (27)	31.3	115.1
							1948-1979 (32)	70.5	367.7
2b	Tampico	Tamaulipas	22° 14'	97° 53'	12	Aw <sub>0</sub> ''(e)	1965-1979 (15)	32.5	72.1
							1921-1979 (59)	35.8	248.2
3b	Tansabaca	San Luis Potosí	21° 40'	99° 13'	196	Aw <sub>1</sub> (w)(e)g	1961-1979 (18)	29.6	101.1
							1958-1979 (22)	72.4	318.8
4b	Chicontepec	Veracruz	20° 59'	98° 10'	595	(A)C(fm)a(e)g	1961-1979 (18)	32.9	98.5
							1923-1979 (43)	52.9	341.0
a	José Salomé Acosta	Durango	25° 13'	105° 26'	1 670	BS <sub>1</sub> kw(e)	1970-1978 (9)	12.0	28.2
							1970-1978 (9)	17.2	69.3
b	El Naranjo	San Luis Potosí	22° 38'	99° 20'	330	Aw'' <sub>2</sub> (e)	1971-1978 (8)	30.1	83.8
							1958-1979 (22)	77.5	310.5

\* metros sobre el nivel del mar.

de las series de lluvias máximas en una hora. En el cuadro 1 se exponen las características generales de los registros pluviométricos.

Considerando que actualmente el acceso a los boletines climatológicos utilizados puede ser difícil, en el cuadro 2 se presentan los datos de precipitación horaria procesados. Respecto a los registros de lluvias máximas diarias anuales empleados, éstos pueden ser obtenidos en el sistema *ERIC II* (IMTA, 2000), para los periodos mostrados en el cuadro 1.

### Procesamiento probabilístico

Las series de valores máximos anuales de lluvia en una hora, en milímetros, fueron procesadas ajustándoles tres modelos probabilísticos: (1) la distribución Log-Pearson tipo III (Bobée y Ashkar, 1991; Campos-Aranda, 2002); (2) la distribución General de Valores Extremos (Raynal-Villaseñor, 1984), y (3) la distribución tipo exponencial de raíz cuadrada (TERC), que fue deducida para procesar lluvias máximas (Etoh *et al.*, 1984). Las dos primeras distribuciones han sido sugeridas por Stedinger *et al.* (1993) para el análisis de frecuencia de lluvias máximas. Los tres parámetros de ajuste de la primera distribución se obtuvieron por los métodos de momentos en el dominio logarítmico y real, adoptando el que condujo al menor error estándar de ajuste (Kite, 1977); igual criterio se siguió para los tres parámetros de la segunda, pero empleando cuatro métodos de ajuste (Campos-Aranda, 2001). Para la obtención de los dos parámetros de ajuste de la función TERC, se utilizó un método basado en el coeficiente de variación (Zorraquino-Junquera, 2004; Campos-Aranda, 2008). Las series de lluvias máximas diarias anuales también fueron procesadas a través de los tres modelos probabilísticos citados.

En el cuadro 3 se tienen las predicciones de lluvia horaria para los seis periodos de retorno que serán analizados. Como ya se indicó, los valores adoptados corresponden al modelo probabilístico que aportó el menor error estándar de ajuste (EEA); tales magnitudes se

muestran en negritas. En el cuadro 4 se tienen las predicciones relativas a la lluvia máxima diaria. Al tener sólo dos parámetros de ajuste, la distribución TERC es menos flexible y, por ello, casi siempre conduce a un mayor EEA. Sin embargo, por su naturaleza específica para modelar lluvias máximas, sus predicciones resultan muy útiles con fines de verificación y/o ratificación de las obtenidas con los otros dos modelos aplicados.

### Búsqueda de la relación entre las predicciones horarias y las diarias

En la figura 1 se muestran, para la zona norte-centro, las relaciones entre predicciones que define cada estación pluviográfica y su respectiva pluviométrica, con base en los seis periodos de retorno ( $Tr$ ) procesados. Se observa que de las cinco estaciones procesadas, una de ellas, Cazadero, presenta una relación no lineal. Del resto, Ciudad Lerdo muestra la relación con valores más bajos para la variable buscada ( $P_1^{Tr}$ ), por ello se aceptó combinar las relaciones de la presa El Palmito, Cañón Fernández y Saltillo, para establecer la representativa de esta región, la cual resultó ser (Campos-Aranda, 2010):

$$P_1^{Tr} = -6.4674 + 0.7855 \cdot P_D^{Tr} \quad (1)$$

en la que  $P_D^{Tr}$  es la lluvia diaria con igual periodo de retorno ( $Tr$ ) que la precipitación horaria buscada. La ecuación anterior se definió con 18 parejas de datos; su coeficiente de determinación ( $R^2$ ) resultó de 0.9756 y su error estándar de la estimación de 2.8 mm.

En la figura 2 se muestran las relaciones encontradas en la zona centro-este, en la cual se observa que en la estación Tampico se establece la más disímil con el resto, quizás debido a la influencia marítima o a su registro reducido. La estación Tansabaca define magnitudes bajas para la variable buscada en los periodos de retorno reducidos, por ello únicamente se combinaron las relaciones de las estaciones Ahualulco y Chicontepic, para establecer la que representa a esta región, la cual es:

Cuadro 2. Precipitaciones horarias en milímetros registradas en las estaciones pluviográficas indicadas.

Núm.	Presa El Palmito	Cañón Fernández	Ciudad Lerdo	Cazadero	Saltillo	Ahualulco	Tampico	Tansabaca	Chicontepec	J. Salomé Acosta	El Naranjo
1	19.0	60.5	30.3	25.8	48.0	58.0	44.4	29.6	33.4	20.0	57.3
2	25.7	45.1	23.8	21.0	37.9	71.5	32.7	42.0	52.6	28.2	36.8
3	18.0	36.0	20.0	25.9	23.8	66.0	55.5	75.4	45.4	27.7	69.0
4	23.6	22.6	24.4	30.6	25.5	49.5	32.5	37.8	32.9	21.5	36.9
5	13.3	29.7	23.3	15.8	39.2	57.5	58.5	34.4	55.0	18.8	33.7
6	20.0	22.2	16.7	38.9	16.8	104.0	48.6	45.1	45.5	23.8	30.1
7	21.4	27.3	13.8	29.3	49.7	63.4	45.2	85.6	36.9	27.4	52.4
8	16.5	15.2	10.1	41.4	19.8	70.0	55.6	40.5	67.0	12.0	83.8
9	29.1	26.6	22.9	24.7	35.4	71.6	51.5	43.6	64.3	19.1	
10	13.6	26.5	29.7	24.3	17.1	90.0	72.1	55.0	41.6		
11	17.8	12.0	12.5	20.1	8.5	62.0	33.0	67.3	55.9		
12	15.8	14.5	23.5	23.8	28.5	62.0	50.8	40.5	66.6		
13	28.3	39.3	11.4	15.3	41.6	56.4	34.1	66.1	98.5		
14	19.7	24.6	43.4	43.1	37.2	52.5	45.4	101.1	61.7		
15	41.0	20.2	20.2	25.5	6.2	56.4	40.5	76.5	33.7		
16	18.3	12.3	15.8	25.7	13.6	63.9		32.4	83.4		
17	10.1	14.1	35.1		14.0	65.6		41.7	33.3		
18	57.6	14.2	17.9		14.1	45.0		33.0	38.7		
19	38.9	12.0	13.7		11.5	56.5					
20	25.0	15.0	31.5		5.0	115.1					
21	34.5	17.2	29.1		8.3	58.4					
22	19.9	20.0	15.0			75.2					
23	22.3	14.5	6.3			49.4					
24	25.1	16.2	20.0			76.2					
25	26.0	29.5	37.8			54.5					
26	33.0	11.0	31.6			35.5					
27	47.0	14.0	36.0			31.3					
28	40.0	16.0	50.9								
29	18.9	10.8	20.2								
30	14.7	24.4	14.2								
31	19.5	25.1	14.8								
32	25.7	19.0	22.2								
33	35.0	18.4									
34	31.0	11.4									
35	52.0	10.1									
36	17.1	6.1									
37	26.5	16.3									
38	37.3	23.1									

Cuadro 3. Predicciones de lluvia máxima horaria (mm) en las estaciones pluviográficas indicadas de las regiones norte-centro y centro-este de México.

Nombre de la estación pluviográfica y modelo probabilístico aplicado	EEA* (mm)	Periodos de retorno de diseño, en años					
		2	5	10	25	50	100
<b>(1a) Presa El Palmito (Durango)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	1.5	23.9	33.8	40.9	50.5	58.0	66.0
2. General de Valores Extremos	1.4	<b>23.8</b>	<b>33.6</b>	<b>40.9</b>	<b>50.9</b>	<b>59.0</b>	<b>67.7</b>
3. TERC	2.0	23.7	32.9	39.7	49.2	56.8	64.9
<b>(2a) Cañón Fernández (Durango)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	2.3	18.3	27.3	34.2	44.0	52.1	60.8
2. General de Valores Extremos	2.2	<b>18.1</b>	<b>26.9</b>	<b>33.9</b>	<b>44.3</b>	<b>53.3</b>	<b>63.6</b>
3. TERC	2.4	18.3	27.2	33.9	43.3	50.9	59.1
<b>(3a) Ciudad Lerdo (Durango)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	1.5	21.6	30.9	36.8	43.7	48.5	53.1
2. General de Valores Extremos	1.5	<b>21.2</b>	<b>30.4</b>	<b>36.6</b>	<b>44.6</b>	<b>50.6</b>	<b>56.8</b>
3. TERC	2.1	20.7	29.2	35.6	44.3	51.4	58.9
<b>(4a) Cazadero (Zacatecas)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	2.4	25.7	33.1	38.0	44.0	48.4	52.8
2. General de Valores Extremos	2.3	<b>25.7</b>	<b>33.2</b>	<b>38.2</b>	<b>44.6</b>	<b>49.4</b>	<b>54.2</b>
3. TERC	2.9	24.6	31.4	36.3	42.9	48.2	53.7
<b>(5a) Saltillo (Coahuila)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	2.3	<b>20.7</b>	<b>35.2</b>	<b>44.9</b>	<b>57.1</b>	<b>65.8</b>	<b>74.3</b>
2. General de Valores Extremos	3.0	21.9	35.3	43.7	53.8	60.8	67.5
3. TERC	4.7	20.4	32.1	41.0	53.7	64.1	75.2
<b>(1b) Ahualulco (Tamaulipas)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	4.9	61.1	77.2	87.5	100.3	109.5	118.6
2. General de Valores Extremos	4.8	<b>61.1</b>	<b>76.9</b>	<b>87.4</b>	<b>100.9</b>	<b>111.0</b>	<b>121.1</b>
3. TERC	5.1	59.2	74.3	85.1	99.7	111.3	123.4
<b>(2b) Tampico (Tamaulipas)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	2.9	45.4	55.6	61.9	69.4	74.7	79.8
2. General de Valores Extremos	2.8	<b>45.5</b>	<b>56.0</b>	<b>62.2</b>	<b>69.3</b>	<b>74.0</b>	<b>78.4</b>
3. TERC	4.2	43.1	52.3	58.9	67.7	74.6	81.8
<b>(3b) Tansabaca (San Luis Potosí)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	5.5	<b>47.1</b>	<b>65.8</b>	<b>80.5</b>	<b>102.1</b>	<b>120.6</b>	<b>141.2</b>
2. General de Valores Extremos	5.6	47.0	65.6	80.1	101.6	120.1	140.9
3. TERC	6.2	47.7	65.2	78.1	95.9	110.2	125.3
<b>(4b) Chicontepec (Veracruz)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	4.2	48.3	65.0	77.4	94.5	108.4	123.3
2. General de Valores Extremos	4.1	<b>48.4</b>	<b>65.3</b>	<b>77.6</b>	<b>94.5</b>	<b>108.1</b>	<b>122.6</b>
3. TERC	5.1	48.0	63.5	74.8	90.3	102.6	115.6
<b>(a) José Salomé Acosta (Durango)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	1.9	22.7	26.5	28.0	29.2	29.8	30.2
2. General de Valores Extremos	1.6	<b>22.7</b>	<b>27.0</b>	<b>28.7</b>	<b>30.2</b>	<b>30.8</b>	<b>31.3</b>
3. TERC	2.8	20.4	24.7	27.8	32.0	35.3	38.7
<b>(b) El Naranjo (San Luis Potosí)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	6.8	<b>45.2</b>	<b>63.0</b>	<b>76.9</b>	<b>96.9</b>	<b>113.9</b>	<b>132.6</b>
2. General de Valores Extremos	6.8	44.9	63.0	76.8	96.6	113.4	131.9
3. TERC	7.5	45.4	61.4	73.2	89.4	102.4	116.0

\* error estándar de ajuste.

Cuadro 4. Predicciones de lluvia máxima diaria (mm) en las estaciones pluviométricas indicadas de las regiones norte-centro y centro-este de México.

Nombre de la estación pluviométrica y modelo probabilístico aplicado	EEA* (mm)	Periodos de retorno de diseño, en años					
		2	5	10	25	50	100
<b>(1a) Presa El Palmito (Durango)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	2.3	40.0	53.1	62.6	75.6	86.1	97.2
2. General de Valores Extremos	2.2	<b>39.8</b>	<b>52.9</b>	<b>62.6</b>	<b>76.4</b>	<b>87.8</b>	<b>100.2</b>
3. TERC	2.9	39.5	51.9	60.9	73.3	83.1	93.4
<b>(2a) Cañón Fernández (Durango)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	2.7	<b>28.4</b>	<b>40.4</b>	<b>50.0</b>	<b>64.1</b>	<b>76.3</b>	<b>90.0</b>
2. General de Valores Extremos	2.9	28.2	40.0	49.5	64.2	77.3	92.4
3. TERC	3.1	28.9	40.5	49.2	61.2	70.9	81.1
<b>(3a) Ciudad Lerdo (Durango)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	2.1	<b>38.6</b>	<b>54.8</b>	<b>65.3</b>	<b>78.2</b>	<b>87.4</b>	<b>96.5</b>
2. General de Valores Extremos	2.1	38.9	54.9	65.1	77.4	86.2	94.7
3. TERC	3.7	37.4	51.9	62.6	77.5	89.4	102.1
<b>(4a) Cazadero (Zacatecas)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	4.6	<b>37.2</b>	<b>49.4</b>	<b>59.1</b>	<b>73.5</b>	<b>85.9</b>	<b>99.8</b>
2. General de Valores Extremos	4.9	37.5	49.4	58.6	72.0	83.5	96.4
3. TERC	5.0	37.4	49.5	58.4	70.4	80.1	90.2
<b>(5a) Saltillo (Coahuila)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	2.6	37.4	52.6	63.1	76.6	87.0	97.6
2. General de Valores Extremos	2.5	<b>38.5</b>	<b>53.7</b>	<b>63.9</b>	<b>76.8</b>	<b>86.5</b>	<b>96.2</b>
3. TERC	3.7	36.8	50.5	60.6	74.6	85.8	97.7
<b>(1b) Ahualulco (Tamaulipas)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	16.0	<b>141.5</b>	<b>190.8</b>	<b>226.1</b>	<b>273.7</b>	<b>311.4</b>	<b>351.0</b>
2. General de Valores Extremos	16.1	141.9	190.5	225.4	272.8	310.5	350.2
3. TERC	16.4	139.5	187.3	222.5	270.7	309.3	349.9
<b>(2b) Tampico (Tamaulipas)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	6.1	104.0	146.7	176.2	214.6	244.0	274.0
2. General de Valores Extremos	5.9	<b>103.3</b>	<b>145.7</b>	<b>176.2</b>	<b>217.7</b>	<b>250.8</b>	<b>285.7</b>
3. TERC	7.8	102.2	141.9	171.4	212.3	245.1	279.8
<b>(3b) Tansabaca (San Luis Potosí)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	16.7	147.5	217.4	266.7	331.9	382.4	434.4
2. General de Valores Extremos	16.4	<b>150.9</b>	<b>220.2</b>	<b>267.1</b>	<b>327.4</b>	<b>372.9</b>	<b>418.9</b>
3. TERC	21.1	145.7	208.1	254.7	319.6	372.0	427.5
<b>(4b) Chicontepec (Veracruz)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	11.7	120.9	167.6	203.8	256.3	300.5	349.4
2. General de Valores Extremos	11.4	<b>119.9</b>	<b>164.6</b>	<b>201.1</b>	<b>257.0</b>	<b>306.8</b>	<b>364.8</b>
3. TERC	13.1	121.7	168.6	203.4	251.5	290.0	330.9
<b>(a) José Salomé Acosta (Durango)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	4.8	38.0	51.5	59.2	67.6	73.1	78.0
2. General de Valores Extremos	4.3	<b>36.8</b>	<b>51.3</b>	<b>60.4</b>	<b>71.5</b>	<b>79.3</b>	<b>86.9</b>
3. TERC	5.7	35.5	48.2	57.6	70.5	80.9	91.8
<b>(b) El Naranjo (San Luis Potosí)</b>							
1. Log-Pearson tipo III	12.0	130.8	182.7	222.0	277.3	322.9	372.5
2. General de Valores Extremos	11.8	<b>131.4</b>	<b>183.6</b>	<b>222.2</b>	<b>276.2</b>	<b>320.4</b>	<b>368.0</b>
3. TERC	14.5	131.1	179.8	215.8	265.5	305.3	347.4

\* error estándar de ajuste.

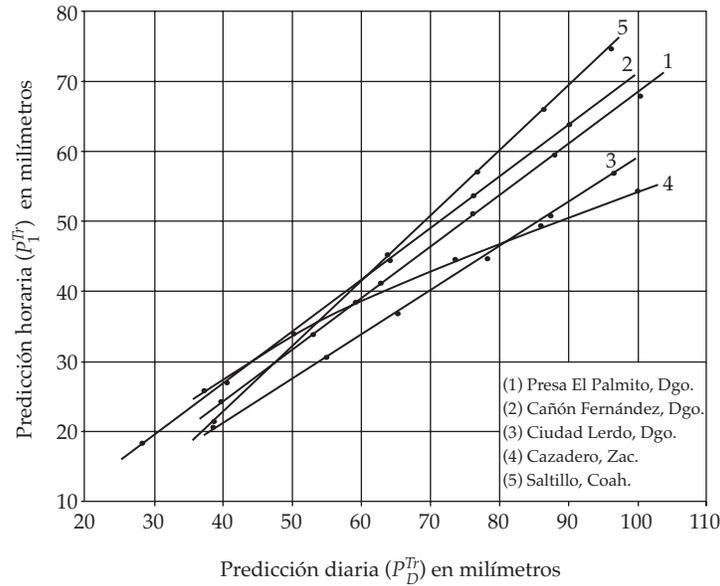


Figura 1. Relaciones entre las predicciones de lluvia horaria y diaria en los seis periodos de retorno analizados de las cinco estaciones pluviográficas de la zona centro-norte de México.

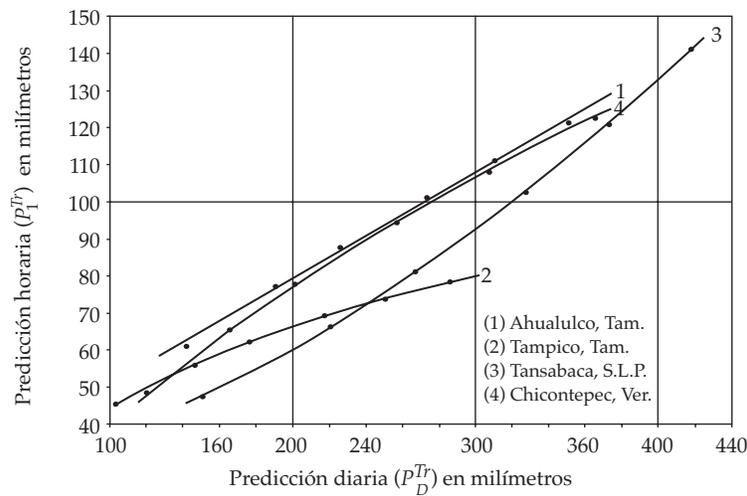


Figura 2. Relaciones entre las predicciones de lluvia horaria y diaria en los seis periodos de retorno analizados de las cuatro estaciones pluviográficas de la zona centro-este de México.

$$P_1^{Tr} = 17.763 + 0.2963 \cdot P_D^{Tr} \quad (2)$$

cuyo coeficiente de determinación ( $R^2$ ) resultó de 0.9910 y su error estándar de la estimación de 2.4 mm.

En la búsqueda de una mejor relación entre las variables  $P_1^{Tr}$  y  $P_D^{Tr}$ , que involucre más datos de la región para su definición, se probó estandarizar las predicciones con base en el valor medio del registro pluviométrico

disponible. En el cuadro 5 se exponen las predicciones adimensionales definidas en cada registro, horario y diario. Al dibujar estas nuevas relaciones, en ambas zonas estudiadas se conservan las formas establecidas y, por lo tanto, las relaciones regionales quedan definidas igual, sólo mejoran sutilmente los resultados; por ello, éstas serán las utilizadas en las estimaciones. Para la zona norte-centro se obtiene (Campos-Aranda, 2010):

$$\left(\frac{P_1^{Tr}}{PMD}\right) = -0.1714 + 0.7881 \cdot \left(\frac{P_D^{Tr}}{PMD}\right) \quad (3)$$

en la cual,  $PMD$  es la media de las lluvias máximas diarias anuales. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) resultó de 0.9808 y 0.0642 como error estándar de la estimación. Para la zona centro-este se obtuvo:

$$\left(\frac{P_1^{Tr}}{PMD}\right) = 0.1253 + 0.2950 \cdot \left(\frac{P_D^{Tr}}{PMD}\right) \quad (4)$$

cuyo coeficiente de determinación ( $R^2$ ) resultó de 0.9948 y 0.013 como error estándar de la estimación.

También se llevaron los datos (cuadros 3, 4 y 5) al papel logarítmico, pero se siguen definiendo los mismos patrones en las relaciones estudiadas, de manera que no se encontró forma racional de involucrar más datos en el establecimiento de las relaciones regionales buscadas, como lograron hacerlo Nguyen y Chaleeraktragoon (1990).

#### Verificación de la capacidad predictiva

Al final de los cuadros 1, 3 y 4 se tienen dos estaciones pluviográficas, una de cada zona analizada, que no fueron procesadas debido a su registro corto, pero que serán utilizadas para contrastar las estimaciones de predicciones obtenidas con las relaciones encontradas (ecuaciones (3) y (4)). En la estación José

Salomé Acosta, la  $PMD$  es igual a 39.1 mm y en El Naranjo es de 144.8 mm.

En el cuadro 6 se muestran las predicciones horarias y diarias estimadas a través de los datos, así como las horarias obtenidas aplicando las ecuaciones (3) y (4), relativas a cada región estudiada. Además se presenta el error relativo (ER), cuya expresión es:

$$ER = \frac{(P_1^{Tr})_{estim} - (P_1^{Tr})_{obser}}{(P_1^{Tr})_{obser}} 100 \quad (5)$$

en donde el error relativo se expresa en porcentaje y presenta un valor negativo cuando la lluvia horaria estimada resulta menor que la observada; en cambio, cuando conduce a un valor positivo, indica que la precipitación horaria estimada resulta superior a la observada.

En la estación pluviográfica José Salomé Acosta, su registro conduce a unas predicciones horarias que resultan inferiores a los valores esperados, en comparación con los mostrados en el cuadro 3 para la región norte-centro. Lo anterior se refleja numéricamente en las predicciones estimadas y en sus respectivos errores relativos positivos. Por el contrario, en la estación pluviográfica El Naranjo, las predicciones observadas sí coinciden con los valores regionales del cuadro 3, por ello los errores relativos encontrados son muy bajos, excepto en el periodo de retorno de dos años.

#### Aplicación para la estimación de las curvas IDF

La utilidad fundamental de la estimación de las predicciones de lluvia horaria es que permiten inferir unas curvas IDF en la estación pluviométrica auxiliar con base en el procedimiento siguiente:

Paso 1. Se obtienen las predicciones diarias ( $P_D^{Tr}$ ) y se transforman a precipitaciones en 24 horas de duración al multiplicarlas por 1.13 (Weiss, 1964).

Cuadro 5. Predicciones adimensionales de lluvia máxima horaria y diaria (mm) en las estaciones indicadas de las regiones norte-centro y centro-este de México.

Nombre de la estación pluviográfica y tipo de lluvia máxima	PMD* (mm)	Periodos de retorno de diseño, en años					
		2	5	10	25	50	100
<b>(1a) Presa El Palmito (Durango)</b>							
Horaria		0.550	0.776	0.945	1.176	1.363	1.564
Diaria	43.3	0.919	1.222	1.446	1.764	2.028	2.314
<b>(2a) Cañón Fernández (Durango)</b>							
Horaria		0.564	0.838	1.056	1.380	1.660	1.981
Diaria	32.1	0.885	1.259	1.558	1.997	2.377	2.804
<b>(3a) Ciudad Lerdo (Durango)</b>							
Horaria		0.511	0.733	0.882	1.075	1.219	1.369
Diaria	41.5	0.930	1.320	1.573	1.884	2.106	2.325
<b>(4a) Cazadero (Zacatecas)</b>							
Horaria		0.627	0.810	0.932	1.088	1.205	1.322
Diaria	41.0	0.907	1.205	1.441	1.793	2.095	2.434
<b>(5a) Saltillo (Coahuila)</b>							
Horaria		0.509	0.865	1.103	1.403	1.617	1.826
Diaria	40.7	0.946	1.319	1.570	1.887	2.125	2.364
<b>(1b) Ahualulco (Tamaulipas)</b>							
Horaria		0.399	0.502	0.570	0.659	0.725	0.790
Diaria	153.2	0.924	1.245	1.476	1.787	2.033	2.291
<b>(2b) Tampico (Tamaulipas)</b>							
Horaria		0.402	0.494	0.549	0.612	0.653	0.692
Diaria	113.3	0.912	1.286	1.555	1.921	2.214	2.522
<b>(3b) Tansabaca (San Luis Potosí)</b>							
Horaria		0.288	0.403	0.493	0.625	0.739	0.865
Diaria	163.3	0.924	1.348	1.636	2.005	2.284	2.565
<b>(4b) Chicontepec (Veracruz)</b>							
Horaria		0.359	0.484	0.575	0.701	0.801	0.909
Diaria	134.9	0.889	1.220	1.491	1.905	2.274	2.704

\* precipitación media de la máxima diaria anual observada.

Paso 2. Con base en la relación regional definida, del tipo de las ecuaciones (3) o (4), se obtiene la predicción de lluvia horaria de periodo de retorno de 10 años ( $P_1^{10}$ ).

Paso 3. Se calculan los cocientes lluvia-duración ( $R$ ) y lluvia-frecuencia ( $F$ ), definidos por las expresiones siguientes (Chen, 1983):

$$R = \frac{P_1^{10}}{P_{24}^{10}} \quad (6)$$

$$F = \frac{P_{24}^{100}}{P_{24}^{10}} \quad (7)$$

Se pueden estimar hasta seis valores del cociente  $R$ , uno para cada periodo de retorno procesado para formar la relación regional, para obtener su promedio. Campos-Aranda (2010) ha sugerido emplear tres para estimar el valor de  $R$ , los de periodos de retorno de 10, 25 y 50 años.

Paso 4. Se aplica la fórmula de Chen para obtener las intensidades buscadas; su expresión es (Chen, 1983):

$$i_{Tr} = \frac{a P_1^{10} \log(10^{2-F} Tr^{F-1})}{(t+b)^c} \quad (8)$$

Cuadro 6. Predicciones de lluvia máxima horaria (mm) observadas y estimadas en las dos estaciones pluviográficas indicadas.

Nombre de la estación pluviométrica y modelo probabilístico aplicado	Periodos de retorno de diseño, en años					
	2	5	10	25	50	100
<b>(a) José Salomé Acosta (Durango) <math>PMD = 39.1</math> mm</b>						
Predicciones horarias observadas	22.7	27.0	28.7	30.2	30.8	31.3
Predicciones diarias observadas	36.8	51.3	60.4	71.5	79.3	86.9
Predicciones horarias estimadas con la ecuación (3)	22.3	33.7	40.9	49.6	55.8	61.8
Error relativo (%)	-1.8	24.8	42.5	64.2	81.2	97.4
<b>(b) El Naranjo (San Luis Potosí) <math>PMD = 144.8</math> mm</b>						
Predicciones horarias observadas	45.2	63.0	76.9	96.9	113.9	132.6
Predicciones diarias observadas	131.4	183.6	222.2	276.2	320.4	368.0
Predicciones horarias estimadas con la ecuación (4)	56.9	72.3	83.7	99.6	112.7	126.7
Error relativo (%)	25.4	14.8	8.8	2.8	-1.1	-4.4

donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son parámetros función del cociente  $R$ ; sus expresiones se pueden consultar en Campos-Aranda (2010);  $i_t^{Tr}$  está en mm/h;  $P_1^{10}$ , en mm;  $t$ , en minutos ( $5 \leq t \leq 1440$ ), y  $Tr$  ( $5 \leq Tr \leq 100$ ) en años. Los valores calculados de  $i_t^{Tr}$  permiten dibujar las curvas IDF.

## Conclusiones

El procesamiento probabilístico —según series de máximos anuales— de la información pluviográfica de una hora de duración y de la pluviométrica relativa a la máxima diaria permite obtener sus predicciones asociadas con seis periodos de retorno ( $Tr$ ) de diseño. A partir de tales predicciones ( $P_1^{Tr}$  y  $P_D^{Tr}$ ) se verificó que existe una relación lineal entre ellas del tipo:  $[P_1^{Tr}/PMD] = b + m \cdot [P_D^{Tr}/PMD]$ , en la cual  $PMD$  es la media aritmética de las precipitaciones máximas diarias anuales disponibles. Con base en las estaciones pluviográficas de una zona, que definen una relación lineal, se obtiene la ecuación regional, la cual permite realizar la estimación de predicciones de lluvia horaria cuando se conocen sólo las correspondientes a

la lluvia diaria, en una localidad de tal región o subregión climáticamente homogénea.

El haber encontrado tal relación lineal regional en dos zonas geográficas disímiles de México, una semiárida y la otra sub-húmeda, plantea la posibilidad de establecerla en otras regiones y subregiones que tengan la información pluviográfica citada, a fin de llevar a cabo estimaciones de las predicciones de lluvia horaria más precisas en localidades ubicadas dentro de tales áreas, a partir de las predicciones de la lluvia diaria disponibles.

Se sugiere aplicar el procesamiento descrito en otras zonas geográficas del país, para obtener predicciones de lluvia horaria más exactas y llegar a estimar curvas IDF más confiables, según el método expuesto, basado en la fórmula de Chen. Al realizar lo anterior se deberá actualizar la información pluviográfica y pluviométrica por procesar, a fin de incorporar los efectos originados recientemente por el cambio climático.

## Agradecimientos

Se gradecen las correcciones sugeridas por los dos árbitros anónimos, pues permitieron volver más explícito el trabajo.

Recibido: 18/01/11

Aceptado: 25/10/11

## Referencias

- BOBÉE, B. y ASHKAR, F. *The Gamma Family and Derived Distributions Applied in Hydrology*. Chapter 7: Log-Pearson type 3 distribution. Littleton, USA: Water Resources Publications, 1991, pp. 76-120.
- CAMPOS-ARANDA, D.F. Contraste de cinco métodos de ajuste de la distribución GVE en 31 registros históricos de eventos máximos anuales. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XVI, núm. 2, abril-junio del 2001, pp. 77-92.
- CAMPOS-ARANDA, D.F. Contraste de seis métodos de ajuste de la distribución Log-Pearson tipo III en 31 registros históricos de eventos máximos anuales. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XVII, núm. 2, abril-junio del 2002, pp. 77-97.
- CAMPOS-ARANDA, D. F. *Descripción y aplicación de la distribución TERC para obtener predicciones de precipitación máxima diaria*. XX Congreso Nacional de Hidráulica. Tema: Hidrología Superficial y Subterránea, Ponencia 3. Toluca, Estado de México, octubre de 2008.
- CAMPOS-ARANDA, D.F. *Introducción a la Hidrología Urbana*. Capítulo 3: Técnicas Estadísticas y Probabilísticas y Capítulo 4: Estimación de curvas intensidad-duración-frecuencia. San Luis Potosí, México: edición del autor, marzo de 2010, pp. 25-51 y 53-75.
- CHEN, C.L. Rainfall Intensity-Duration-Frequency formulas. *Journal of the Hydraulics Engineering*. Vol. 109, No. 12, 1983, pp. 1603-1621.
- ETOH, T., MUROTA, A., and NAKANISHI, M. SQRT-Exponential Type Distribution of Maximum. *Hydrologic Frequency Modeling*. Singh, V.P. (editor). Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company, 1984, pp. 253-264.
- IMTA. *ERIC II: Extractor Rápido de Información Climatológica 1920-1998*. Jiutepec, México: IMTA-Semarnat-Conagua, 2000.
- KITE, G.W. *Frequency and Risk Analyses in Hydrology*. Chapter 12: Comparison of frequency distributions. Fort Collins, USA: Water Resources Publications, 1977, pp. 156-168.
- NGUYEN, V.T.V. and CHALEERAKTRAKOON, C.H. Estimation of hourly rainfall distribution based on available daily rainfall data. *Symposium Proceedings on Urban Hydrology*. Bethesda, USA: American Water Resources Association, 1990, pp. 67-76.
- RAYNAL-VILLASEÑOR, J.A. La distribución General de Valores Extremos en Hidrología: 2. Estado actual y aplicaciones. Tomo I, subtema 2. 8º Congreso Nacional de Hidráulica, Toluca, México, noviembre de 1984, pp. B.1-B.19.
- SARH. *Boletín Climatológico No. 4. Región Hidrológica No. 36. Nazas-Aguanaval*. México, D.F.: Subsecretaría de Planeación, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1980.
- SARH. *Boletín Climatológico No. 5. Región Hidrológica No. 26. Pánuco*. Tomos I y II. México, D.F.: Subsecretaría de Planeación, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1982.
- SARH. *Boletín Climatológico No. 6. Regiones Hidrológicas No. 24 Oriente (Bajo Río Bravo) y No. 25 Golfo Norte (San Fernando-Soto La Marina)*. México, D.F.: Subsecretaría de Planeación, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1983.
- STEDINGER, J.R., VOGEL, R.M., and FOUFOULA-GEORGIU, E. Frequency Analysis of Extreme Events. Chapter 18. In *Handbook of Hydrology*. Maidment, D.R. (editor). New York: McGraw-Hill, Inc., 1993, pp. 18.1-18.66.
- WEISS, L.L. Ratio of true fixed-interval maximum rainfall. *Journal of Hydraulics Division*. Vol. 90, No. HY1, 1964, pp. 77-82.
- ZORRAQUINO-JUNQUERA, C. El modelo SQRT-ET<sub>MAX</sub>. *Revista de Obras Públicas*. No. 3447, septiembre de 2004, pp. 33-37.

## Abstract

CAMPOS-ARANDA, D.F. *Relation and estimation of hourly-daily rainfall predictions in two geographical zones in Mexico. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. III, No. 2, April-June, 2012, pp. 141-152.*

*When hydrometric records are not available, design floods are estimated through hydrological methods based on intensity-duration-frequency (IDF) curves. These curves can be estimated using hourly and daily predictions in locations without recording rain gauges. The occurrence of a linear relation between these predictions was verified for two different geographical zones in Mexico, one semiarid and the other sub-humid. This work shows how to find the regional linear relation, which leads to more accurate hourly predictions and therefore more certain IDF curves, according to the method based on the Chen formula.*

**Keywords:** recording rain gages, annual maximum daily rainfall, probabilistic analysis, Chen formula.

## Dirección institucional del autor

*Dr. Daniel Francisco Campos Aranda*

Profesor jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
Genaro Codina 240, Colonia Jardines del Estadio  
78280 San Luis Potosí, San Luis Potosí, MÉXICO  
Teléfono: +52 (444) 8151 431  
campos\_aranda@hotmail.com