

## Contraste de la distribución TERC en el Altiplano Potosino de México

### *Contrast of the Distribution SRET in the Potosi Highlands in Mexico*

Campos-Aranda D.F.

*Facultad de Ingeniería*

*Universidad Autónoma de San Luis Potosí*

*E-mail. campos\_aranda@hotmail.com*

Información del artículo: recibido: julio de 2007, aceptado: julio de 2010

#### Resumen

Inicialmente se destaca la importancia de las predicciones de lluvia máxima diaria como base para la estimación de las crecientes de diseño, cuando no existe información hidrométrica ni pluviográfica. Además, se citan las ventajas de los métodos regionales ante los valores dispersos en los datos y se formulan los dos objetivos del trabajo. Se continúa con la descripción de la información pluviométrica utilizada. Después se describen y aplican cuatro procedimientos de ajuste regional de la distribución General de Valores Extremos (GVE), a través del método de los momentos L, éstos son: (1) método de las estaciones-años, (2) ajuste por momentos de probabilidad pesada ponderados, (3) método de los valores estandarizados medianos y (4) ajuste con parámetro de forma regional. Posteriormente se aplican tres modelos probabilísticos a los registros pluviométricos, éstos son: las distribuciones GVE, Log-Pearson tipo III y la tipo exponencial de raíz cuadrada (TERC). Por último, se contrastan los resultados regionales con los obtenidos con los modelos locales y se formulan las conclusiones, las cuales destacan la sencillez y mayor aproximación de la función TERC.

#### Abstract

*First, the importance of maximum daily rainfall predictions as the base for designing flood estimation is pointed out, particularly when recording rain-gages and hydro-metric information are not available. Besides, the advantages of regional methods when the data show outliers are cited and the two main objectives of this work are formulated. Next, the pluviometric information used is described. Late, four procedures of regional fit of the General Extreme Values (GEV) distribution are described and applied, based in the L moment technique, which are: (1) station-year method, (2) fit through averaging probability weighted moments, (3) median standardized values method and (4) fit through regional shape parameter. Three probabilistic models are applied to the pluviometric records: GVE, Log-Pearson type III and square-root exponential type (SRET). Finally, the predictions of probabilistic models and the regional results are contrasted; then several conclusions are formulated, which point out the simplicity and greater accuracy of the SRET function.*

#### Descriptores

- precipitación máxima diaria anual
- distribución GVE
- métodos regionales
- distribución TERC

#### Keywords

- annual maximum daily precipitation
- GEV distribution
- regional methods
- SRET distribution

## Introducción

Cuando no existe información hidrométrica, la estimación de las crecientes se aborda a través del procesamiento de los registros pluviográficos para obtener las características de las tormentas de la zona y llegar a construir tormentas de diseño, las cuales se transforman en gastos máximos mediante una relación lluvia-escurrimiento; por ejemplo, el hidrograma unitario. Sin embargo, es frecuente que tampoco existan pluviógrafos cercanos y entonces, el análisis probabilístico de la precipitación máxima diaria anual es el punto de partida en la estimación de una tormenta de diseño.

Actualmente se reconoce que incluso un ajuste satisfactorio a un solo registro de crecientes o lluvias máximas no garantiza estimaciones confiables en los periodos de retorno superiores a 100 años, sino que son necesarios más datos para tratar de alcanzar una buena reproducción de la cola extrema de la distribución (Buishand, 1991).

Generalmente, la dificultad para modelar la cola derecha de la distribución aparece cuando se presentan valores dispersos o *outliers*. Esta necesidad de más datos se satisface usando los registros disponibles en la zona o región, lo cual constituye el enfoque de los *métodos regionales*.

Los objetivos fundamentales de este trabajo son los dos siguientes: el primero consiste en ajustar regionalmente la distribución de probabilidades General de Valores Extremos (GVE), a los 15 registros disponibles de precipitación máxima diaria anual en la zona conocida como Altiplano Potosino, con el propósito de obtener unas predicciones en cada sitio según este enfoque. El

segundo objetivo establece el ajuste en cada estación pluviométrica de las distribuciones actualmente recomendadas para procesar este tipo de registros, con el objeto de contrastar sus resultados contra los del método regional adoptado y seleccionar la función que mejor los reproduce.

## Desarrollo

### Información pluviométrica utilizada

Corresponde a la disponible sobre precipitación máxima diaria anual (mm) en el sistema *ERIC II* (IMTA, 2000), para las estaciones pluviométricas del Altiplano Potosino o porción semiárida del estado de San Luis Potosí que pertenece a la Región Hidrológica No. 37 (El Salado), con más de 30 años de datos; con esta restricción se obtuvieron 15 registros, cuya localización geográfica se muestra en la figura 1; en la tabla 1 se presentan sus características generales y sus parámetros estadísticos insesgados (Campos, 2001).

### Método de las estaciones-años

Los datos máximos anuales (gastos o lluvias) procedentes de varios sitios son conjuntados y tratados como un solo registro (Garros, 1994; Campos, 2006). Este enfoque acepta que los datos son variables aleatorias independientes, lo cual en el caso específico de la precipitación máxima no es estrictamente válido, debido a la dependencia espacial entre las lluvias observadas y a la relación que guarda ésta con la altitud. Para evitar lo anterior, una modificación importante consiste en *estandarizar* los datos, dividiéndolos

entre su media aritmética o entre su mediana (Buishand, 1991).

Al dividir cada dato de un registro entre su valor medio y conjuntar las 15 series del Altiplano Potosino (tabla 1) se obtuvieron 625 valores, cuyo ajuste de la distribución GVE con el método de los momentos L (Stedinger *et al.*, 1993; Campos, 2001), condujo a las predicciones estandarizadas mostradas en la tabla 2.

Al multiplicar estas magnitudes por la media aritmética ( $\bar{x}$ ) de cada

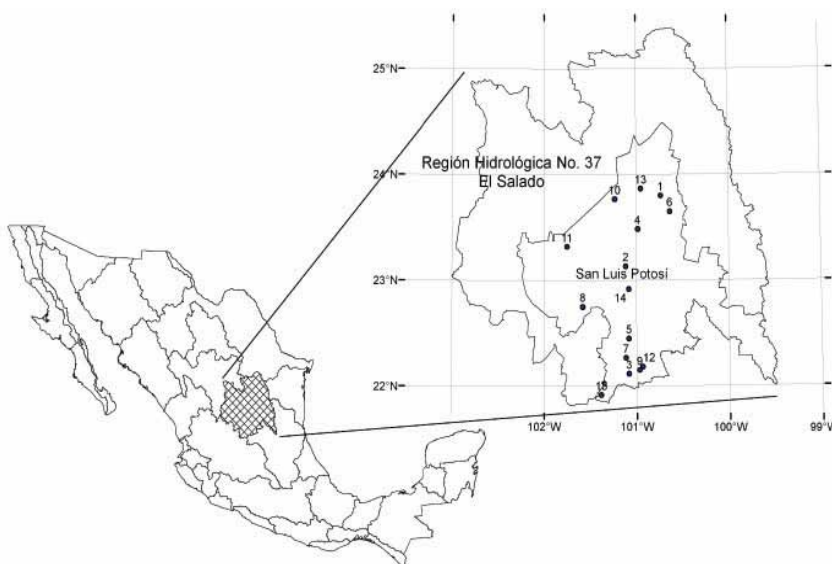


Figura 1. Localización geográfica del altiplano potosino y de los 15 pluviómetros utilizados

Tabla 1. Características generales y estadísticas de las estaciones pluviométricas del Altiplano Potosino

Núm.	Nombre	Clave	Lat.	Long.	Alt.	Registro		Precip. observ.			Media aritmética*	Desv. estándar*	Coef. de asimetría	Coef. de curtosis
						Años	Núm.	Máx.	2o. Máx.	Mín.				
1	Cedral	24007	23°48'	100°44'	1,800	1926–97	57	315.7	118.8	22.5	50.3	40.6	5.273	35.830
2	Charcas	24010	23°08'	101°07'	2,057	1962–97	35	145.0	117.0	12.0	49.0	26.3	1.940	8.134
3	El Peaje	24024	22°07'	101°05'	1,860	1963–97	35	86.5	69.0	20.0	40.7	14.3	1.064	5.273
4	La Maroma	24033	23°29'	100°03'	1,940	1965–97	33	140.1	80.0	21.0	47.8	22.5	2.327	10.918
5	Los Pilares	24038	22°27'	101°05'	1,675	1963–97	35	81.5	74.0	12.5	44.2	15.0	0.655	3.628
6	Matehuala	24040	23°39'	100°38'	1,615	1925–97	70	122.0	120.0	17.5	51.5	24.0	1.187	4.334
7	Mexquitic	24042	22°16'	101°07'	2,062	1942–97	53	84.0	83.0	21.0	49.1	14.5	0.230	3.003
8	Reforma	24073	22°45'	101°35'	2,000	1965–97	33	97.5	82.0	21.5	52.5	18.3	0.372	2.907
9	San Luis Potosí	24069	22°09'	100°58'	1,877	1949–97	49	66.5	65.5	15.8	41.1	13.6	0.286	2.226
10	Sta. Ma. del R.	24074	23°46'	101°14'	1,961	1964–97	34	100.0	63.0	16.0	34.6	17.3	1.919	8.155
11	Sto. Domingo	24077	23°19'	101°45'	1,415	1961–97	37	200.6	185.0	28.0	70.8	41.6	1.915	6.663
12	S. Diez Gtz.	24081	22°11'	100°56'	1,882	1945–97	49	120.0	107.0	14.0	42.6	25.9	1.576	4.957
13	Vanegas	24094	23°52'	100°57'	1,735	1963–97	35	77.0	75.0	12.0	37.7	16.8	0.952	3.326
14	Venado	24096	22°55'	101°05'	1,795	1944–87	37	200.0	120.0	15.0	54.8	36.0	2.105	9.446
15	V. de Arriaga	24100	21°55'	101°23'	2,198	1962–97	35	101.0	75.0	17.0	40.7	16.7	1.635	7.276
	Mag. mínima	–	–	–	1,415	–	33	66.5	63.0	12.0	34.6	13.6	0.230	2.226
	Mag. máxima	–	–	–	2,198	–	70	315.7	185.0	28.0	70.8	41.6	5.273	35.830

\*valores en milímetros.

registro, se obtienen las predicciones respectivas del método de las estaciones-años; en la tabla 3 se muestran las correspondientes a las estaciones Cedral, San Luis Potosí y Villa de Arriaga.

### Método de los momentos de probabilidad pesada ponderados

La regionalización de los momentos de probabilidad pesada ( $b_r$ ) comprende primeramente su estandarización, es decir, su división entre la media  $b_0$  y posteriormente su ponderación con base en la longitud de cada registro ( $n_j$ ), por lo cual:

$$be_r = be_r \frac{n_j}{\sum_{j=1}^{ne} n_j} \quad (1)$$

donde  $ne$  es el número de estaciones pluviométricas utilizadas, en este caso 15. Los valores obtenidos fueron:  $be_0 = 1.000$ ,  $be_1 = 0.62085$  y  $be_2 = 0.46492$ ; a partir de los valores anteriores se ajusta la distribución GVE por medio del método de momentos L (Stedinger *et al.*, 1993; Campos, 2001), para obtener las predicciones estandarizadas mostradas en la tabla 2. Al multiplicar estas magnitudes tabuladas por la media aritmética de cada registro se obtienen las predicciones respectivas de este método, las cuales también se presentan en la tabla 3 únicamente para las estaciones Cedral, San Luis Potosí y Villa de Arriaga.

### Método de los valores estandarizados medianos

Este procedimiento es una adaptación del método tradicional de la avenida índice (Dalrymple, 1960; Cunneane, 1988; Campos, 2006) que utiliza un periodo común

Periodos de retorno (Tr) en años								
2	5	10	25	50	100	500	1,000	10,000
1. Método de las estaciones-años								
0.895	1.285	1.578	1.992	2.336	2.710	3.722	4.229	6.292
2. Método de los momentos de probabilidad pesada ponderados								
0.892	1.281	1.577	1.999	2.352	2.740	3.804	4.344	6.582
3. Método de los valores estandarizados medianos								
0.908	1.267	1.555	1.960	2.269	2.590	3.413	3.804	5.310
4. Método del parámetro de forma ( $k$ ) regional								
-0.295	0.865	1.716	2.893	3.848	4.870	7.549	8.851	13.946

Tabla 2. Predicciones estandarizadas de la distribución GVE para los periodos de retorno expuestos, según el método regional indicado

y por lo cual se visualiza aplicable a 14 de las 15 estaciones pluviométricas del Altiplano Potosino, utilizando registros de 35 años en el periodo de 1963 a 1997 (ver tabla 1); se excluye la estación Venado, cuyo registro no corresponde con tal periodo. Entonces, se ajusta por momentos L la distribución GVE (Stedinger *et al.*, 1993; Campos, 2001), a cada registro de valores estandarizados con su media aritmética para obtener unas predicciones estandarizadas, cuyo valor mediano se indica en la tabla 2; al multiplicar tales valores por la media del registro se calculan las predicciones indicadas en la tabla 3 solamente para las estaciones Cedral, San Luis Potosí y Villa de Arriaga.

### Método del parámetro de forma ( $k$ ) regional

Consiste en ajustar una distribución GVE por momentos L con un procedimiento similar al de las estaciones-años pero utilizando como valores estandarizados los obtenidos con la expresión siguiente:

$$z_i = \frac{x_i - u}{\alpha} \quad (2)$$

en la cual,  $u$  y  $\alpha$  corresponden al parámetro de forma regional ( $k$ ) de la distribución GVE, pero son los relativos a su registro. Entonces, cada vez que se calcula la función GVE de los datos conjuntados se obtiene un nuevo parámetro de forma  $k$  regional, el cual no se cambia y requiere un nuevo cálculo de parámetros  $u$  y

$\alpha$  de cada registro. El proceso se repite hasta que el valor de  $k$  no varía de un tanteo a otro. En la tabla 4 se muestran los resultados de los tanteos y en la tabla 2 las predicciones estandarizadas ( $\hat{z}_i$ ). En cada estación pluviométrica, con base en sus valores finales de  $u$  y  $\alpha$  (tabla 4) y la magnitud  $\hat{z}_i$  se despeja la predicción buscada con la ecuación 2, por ejemplo para un periodo de retorno de 2 años en Cedral se tiene:

$$x_2 = -0.295 \cdot 19.699 + 50.411 = 44.6 \cong 45 \text{ mm}$$

en cambio, para un  $Tr = 10,000$  años en Villa de Arriaga el cálculo es:

$$x_{10,000} = 13.946 \cdot 11.984 + 40.733 = 207.9 \cong 208 \text{ mm}$$

En la tabla 3 se han concentrado el resto de las predicciones estimadas en tales estaciones y en San Luis Potosí.

### Selección de valores regionales

Es importante destacar la semejanza extraordinaria de las predicciones obtenidas a través de los métodos de ajuste regional de la distribución GVE, concentradas una parte en la tabla 3, en los periodos de retorno pequeños ( $< 50$  años) y aún en sus magnitudes más grandes ( $> 100$  años).

Esto brinda gran confianza en tales resultados, dado que estas predicciones provienen de enfoques muy diferentes, como se ha descrito.

Tabla 3. Predicciones en milímetros en las 3 estaciones pluviométricas indicadas del Altiplano Potosino, con base en los cuatro métodos regionales aplicados

Núm.	Estación	Periodos de retorno (Tr) en años								
	Método regional	2	5	10	25	50	100	500	1,000	10,000
1		Cedral ( $\bar{x} = 50.319$ mm)								
	Estaciones—años	45	65	79	100	118	136	187	213	317
	MPP <sup>1</sup> ponderados	45	64	79	101	118	138	191	219	331
	Valores estandarizados medianos	46	64	78	99	114	130	172	191	267
	Parámetro de forma ( <i>k</i> ) regional	45	67	84	107	126	146	199	225	325
9		San Luis Potosí ( $\bar{x} = 41.069$ mm)								
	Estaciones—años	37	53	65	82	96	111	153	174	258
	MPP ponderados	37	53	65	82	97	113	156	178	270
	Valores estandarizados medianos	37	52	64	80	93	106	140	156	218
	Parámetro de forma ( <i>k</i> ) regional	38	51	60	73	83	94	123	137	193
15		Villa de Arriaga ( $\bar{x} = 40.677$ mm)								
	Estaciones—años	36	52	64	81	95	110	151	172	256
	MPP ponderados	36	52	64	81	96	111	155	177	268
	Valores estandarizados medianos	37	51	63	80	92	105	139	155	216
	Parámetro de forma ( <i>k</i> ) regional	37	51	61	75	87	99	131	147	208

1 momentos de probabilidad pesada

Por otra parte, un planteamiento simple y a la vez confiable para la selección de las predicciones regionales en cada estación pluviométrica, es adoptar las más grandes que fueron obtenidas. En las estaciones Cedral, Charcas, Santo Domingo, Soledad Diez Gtz. y Venado, el método del ajuste con parámetro de forma regional

conduce a las mayores predicciones; en cambio, en el resto es el método del ajuste por momentos de probabilidad pesada ponderados.

Por lo anterior, en la tabla 5 de comparaciones, son los resultados de este procedimiento los que representan a métodos regionales.

Núm.	Estación:	Primer tanteo: $k = -0.140$		Segundo tanteo: $k = -0.110$		Tercer tanteo: $k = -0.108$	
		$u$	$\alpha$	$u$	$\alpha$	$u$	$\alpha$
1	Cedral	50.389	19.478	50.409	19.685	50.411	19.699
2	Charcas	49.022	18.184	49.041	18.377	49.042	18.390
3	El Peaje	40.704	10.615	40.715	10.728	40.715	10.736
4	La Maroma	47.815	15.199	47.831	15.360	47.832	15.371
5	Los Pilares	44.227	11.431	44.238	11.552	44.239	11.560
6	Matehuala	51.594	17.802	51.612	17.991	51.613	18.004
7	Mexquitic	49.095	11.360	49.107	11.481	49.108	11.489
8	Reforma	52.563	14.308	52.578	14.459	52.579	14.470
9	San Luis Potosí	41.108	10.748	41.119	10.862	41.120	10.870
10	Santa Ma.del Refugio	34.596	12.131	34.609	12.259	34.610	12.268
11	Santo Domingo	70.898	28.064	70.926	28.362	70.929	28.382
12	Soledad Diez Gtz.	42.665	18.157	42.684	18.350	42.685	18.363
13	Vanegas	37.709	12.761	37.722	12.896	37.723	12.905
14	Venado	54.859	24.783	54.884	25.046	54.886	25.064
15	Villa de Arriaga	40.720	11.850	40.732	11.976	40.733	11.984

Tabla 4. Parámetros de ubicación ( $u$ ) y escala ( $\alpha$ ) de la distribución GVE en las 15 estaciones pluviométricas del Altiplano Potosino, para el parámetro de forma ( $k$ ) regional indicado

Núm.	Estación Método regional y FDP <sup>1</sup>	Periodos de retorno (Tr) en años								
		2	5	10	25	50	100	500	1,000	10,000
1	<i>Cedral</i>									
	GVE <sup>2</sup> regional	45	64	79	101	118	138	191	219	331
	GVE ( $k = -0.469$ )	40	58	77	113	152	206	423	581	1,683
	LP3 <sup>3</sup>	39	57	78	118	162	223	483	680	2,189
	TERC <sup>4</sup> (7.156–0.3898)	40	72	98	136	167	201	290	333	494
2	<i>Charcas</i>									
	GVE regional	44	63	77	98	115	134	186	213	322
	GVE ( $k = -0.171$ )	43	64	80	104	125	148	213	246	392
	LP3	44	66	81	102	119	136	178	198	270
	TERC (32.974–0.7795)	43	64	81	104	123	143	194	218	309
3	<i>El Peaje</i>									
	GVE regional	36	52	64	81	96	111	155	177	268
	GVE ( $k = 0.026$ )	38	51	59	69	77	84	100	106	128
	LP3	39	52	59	69	76	83	97	103	124
	TERC (338.420–1.9166)	37	49	58	70	79	89	114	126	169
4	<i>La Maroma</i>									
	GVE regional	43	61	75	95	112	131	182	207	314
	GVE ( $k = -0.224$ )	42	59	74	95	115	137	204	242	417
	LP3	42	60	74	97	117	140	208	245	417
	TERC (59.848–0.9850)	43	61	75	95	110	127	170	190	265
5	<i>Los Pilares</i>									
	GVE regional	39	57	70	88	104	121	168	192	291
	GVE ( $k = 0.020$ )	42	55	64	75	83	91	109	116	140
	LP3	44	57	63	69	73	76	81	83	87
	TERC (422.456–1.8675)	40	53	62	75	84	95	121	133	178
6	<i>Matehuala</i>									
	GVE regional	46	66	81	103	121	141	196	224	339
	GVE ( $k = -0.108$ )	46	67	83	104	121	140	188	212	304
	LP3	46	68	83	103	120	137	179	199	274

Tabla 5. Contraste de predicciones (mm) en las 15 estaciones pluviométricas del Altiplano Potosino, según métodos indicados (continúa)



7	TERC (63.538–0.9311)	46	66	81	102	118	136	182	203	282
	<i>Mexquitic</i>									
	GVE regional	44	63	77	98	115	134	187	213	323
	GVE ( $k = 0.235$ )	49	62	68	76	80	84	90	92	97
	LP3	48	61	68	76	81	85	93	96	105
8	TERC (1,306.742–2.1635)	46	58	67	78	88	97	122	133	174
	<i>Reforma</i>									
	GVE regional	47	67	83	105	124	144	200	228	346
	GVE ( $k = 0.149$ )	51	68	77	88	95	101	114	118	130
	LP3	51	68	77	88	95	102	116	121	137
9	TERC (359.023–1.5072)	48	63	74	90	102	114	147	162	216
	<i>San Luis Potosí</i>									
	GVE regional	37	53	65	82	97	113	156	178	270
	GVE ( $k = 0.141$ )	40	52	60	68	73	78	88	91	101
	LP3	38	52	60	68	74	79	90	95	108
10	TERC (515.061–2.1119)	38	49	57	68	77	87	110	121	161
	<i>Santa María del Refugio</i>									
	GVE regional	31	44	54	69	81	95	131	150	227
	GVE ( $k = -0.217$ )	30	44	55	72	87	105	157	186	320
	LP3	30	44	56	73	89	106	158	186	313
11	TERC (44.557–1.2321)	31	45	56	71	83	96	129	145	203
	<i>Santo Domingo</i>									
	GVE regional	63	91	112	142	167	194	269	308	466
	GVE ( $k = -0.266$ )	59	91	117	160	199	245	393	479	910
	LP3	60	92	120	164	203	250	392	471	847
12	TERC (21.913–0.4616)	61	95	121	158	188	221	304	344	492
	<i>Soledad Diez Gutiérrez</i>									
	GVE regional	38	55	67	85	100	117	162	185	280
	GVE ( $k = -0.259$ )	35	56	73	100	125	155	247	301	567
	LP3	35	56	74	102	127	156	244	292	515
13	TERC (19.075–0.7250)	36	58	74	97	116	136	189	214	307
	<i>Vanegas</i>									
	GVE regional	34	48	59	75	89	103	143	164	248
	GVE ( $k = -0.111$ )	34	49	60	75	88	101	137	154	221
	LP3	34	49	60	74	85	96	124	137	183
14	TERC (78.947–1.3658)	34	48	58	73	84	97	128	143	198
	<i>Venado</i>									
	GVE regional	49	70	86	109	129	150	208	238	360
	GVE ( $k = -0.198$ )	46	74	97	131	161	195	294	347	586
	LP3	45	75	99	133	162	194	280	323	499
15	TERC (14.232–0.4977)	46	75	98	131	157	186	261	296	429
	<i>Villa de Arriaga</i>									
	GVE regional	36	52	64	81	96	111	155	177	268
	GVE ( $k = -0.085$ )	37	51	62	75	86	98	127	141	193
	LP3	38	52	62	75	85	96	121	133	177
	TERC (128.384–1.4661)	37	51	61	75	87	99	129	144	196

<sup>1</sup> Función de distribución de probabilidades.

<sup>2</sup> General de Valores Extremos.

<sup>3</sup> Log–Pearson tipo III.

<sup>4</sup> Tipo Exponencial de Raíz Cuadrada.

Tabla 5 continuación. Contraste de predicciones (mm) en las 15 estaciones pluviométricas del Altiplano Potosino, según métodos indicados

## Modelos probabilísticos a contrastar

Stedinger *et al.*, (1993) recomiendan para procesar probabilísticamente lluvias máximas las distribuciones Log–Pearson tipo III (LP3) y la GVE. Para evitar subjetividades en este contraste, la función GVE se ajustará a los registros pluviométricos únicamente por medio del método de momentos L (Stedinger *et al.*, 1993; Campos, 2001) y el modelo LP3 sólo a través del método de momentos en el dominio logarítmico (Bobée *et al.*, 1991).

El tercer modelo probabilístico que se contrasta fue desarrollado por Etoh *et al.* (1987) para las lluvias diarias máximas anuales, fue designado SQRT–ET–max como abreviatura de *square–root exponential type distribution of the maximun* y por ello se denomina distribu-

ción tipo exponencial de raíz cuadrada (TERC), su expresión es la siguiente:

$$F(x) = \exp[-k(1 + \sqrt{\alpha \cdot x}) \exp(-\sqrt{\alpha \cdot x})] \quad (3)$$

en la cual,  $F(x)$  es la probabilidad de no excedencia asociada a la variable  $x$ ,  $k$  es el parámetro de frecuencia y  $\alpha$  el de escala. Nanía y Gómez (2004) indican que la distribución TERC ha sido establecida en España como un modelo de referencia, debido principalmente a su origen específico para la modelación probabilística de lluvias máximas diarias anuales.

Para la estimación de los parámetros de ajuste ( $k, \alpha$ ) de la distribución TERC, se ha utilizado el método de las regresiones polinomiales del logaritmo natural del  $C_v$  y

0.190 ≤ Cv ≤ 0.30				0.30 < Cv ≤ 0.70				0.70 < Cv ≤ 0.999			
a <sub>0</sub>	-3,978.19	b <sub>0</sub>	-0.93151	a <sub>0</sub>	1.801513	b <sub>0</sub>	2.342697	a <sub>0</sub>	1.318615	b <sub>0</sub>	2.307319
a <sub>1</sub>	-18,497.5	b <sub>1</sub>	2.156709	a <sub>1</sub>	2.473761	b <sub>1</sub>	-0.14978	a <sub>1</sub>	-3.16463	b <sub>1</sub>	-0.13667
a <sub>2</sub>	-35,681.4	b <sub>2</sub>	-0.77977	a <sub>2</sub>	23.55620	b <sub>2</sub>	-0.09931	a <sub>2</sub>	-1.59552	b <sub>2</sub>	-0.07504
a <sub>3</sub>	-36,581.5	b <sub>3</sub>	0.112962	a <sub>3</sub>	49.95727	b <sub>3</sub>	0.003444	a <sub>3</sub>	-6.26911	b <sub>3</sub>	-0.01346
a <sub>4</sub>	-21,017.8	b <sub>4</sub>	-0.00934	a <sub>4</sub>	59.77564	b <sub>4</sub>	0.001014	a <sub>4</sub>	-11.3177	b <sub>4</sub>	0.003228
a <sub>5</sub>	-6,471.12	b <sub>5</sub>	0.000412	a <sub>5</sub>	35.69688	b <sub>5</sub>	-0.00014	a <sub>5</sub>	-22.6976	b <sub>5</sub>	0.000521
a <sub>6</sub>	-813.381	b <sub>6</sub>	-7.5·10 <sup>-6</sup>	a <sub>6</sub>	8.505713	b <sub>6</sub>	5.49·10 <sup>-6</sup>	a <sub>6</sub>	-22.0663	b <sub>6</sub>	-0.00014

Tabla 6. Valores de los coeficientes a<sub>i</sub> y b<sub>i</sub> en función del Cv

Tabla 7. Diferencias (mm) entre las predicciones regionales y las del modelo probabilístico indicado en las 15 estaciones pluviométricas del Altiplano Potosino

Estación:	P <sub>10,000</sub> regional	Residuos			P <sub>1,000</sub> regional	Residuos			P <sub>500</sub> regional	Residuos			P <sub>100</sub> regional	Residuos		
		GVE <sup>1</sup>	LP3 <sup>2</sup>	TERC <sup>3</sup>		GVE	LP3	TERC		GVE	LP3	TERC		GVE	LP3	TERC
Cedral	331	-1,352	-1,858	-163	219	-362	-461	-114	191	-232	-292	-99	138	-68	-85	-63
Charcas	322	-70	52	13	213	-33	15	-5	186	-27	8	-8	134	-14	-2	-9
El Peaje	268	140	144	99	177	71	74	51	155	55	58	41	111	27	28	22
La Maroma	314	-103	-103	49	207	-35	-38	17	182	-22	-26	12	131	-6	-9	4
Los Pilares	291	151	204	113	192	76	109	59	168	59	87	47	121	30	45	26
Matehuala	339	35	65	57	224	12	25	21	196	8	17	14	141	1	4	5
Mexquitic	323	225	218	149	213	121	117	80	187	97	94	65	134	50	49	37
Reforma	346	216	209	130	228	110	107	66	200	86	84	53	144	43	42	30
San Luis Potosí	270	169	162	109	178	87	83	57	156	68	66	46	113	35	34	26
Sta. Ma. del Refugio	227	-93	-86	24	150	-36	-36	5	131	-26	-27	2	95	-10	-11	-1
Santo Domingo	466	-444	-381	-26	308	-171	-163	-36	269	-124	-123	-35	194	-51	-56	-27
Soledad Diez Gtz.	280	-287	-235	-27	185	-116	-107	-29	162	-85	-82	-27	117	-38	-39	-19
Vanegas	248	27	65	50	164	10	27	21	143	6	19	15	103	2	7	6
Venado	360	-226	-139	-69	238	-109	-85	-58	208	-86	-72	-53	150	-45	-44	-36
Villa de Arriaga	268	75	91	72	177	36	44	33	155	28	34	26	111	13	15	12
Máximo negativo	-	-1,352	-1,858	-163	-	-362	-461	-114	-	-232	-292	-99	-	-68	-85	-63
Máximo positivo	-	225	218	149	-	121	117	80	-	97	94	65	-	50	49	37

<sup>1</sup> General de Valores Extremos.<sup>2</sup> Log-Pearson tipo III.<sup>3</sup> Tipo Exponencial de Raíz Cuadrada.

$k$ , desarrollado por Zorraquino (2004) y aplicado por Nanía y Gómez (2004) y Campos (2008), el cual comienza por evaluar el coeficiente de variación ( $Cv$ ), como el cociente entre la desviación estándar y la media; con base en tal valor se selecciona uno de los tres intervalos siguientes: 0.190 a 0.30, 0.30 a 0.70 y 0.70 a 0.999. El parámetro de frecuencia se estima con la fórmula siguiente:

$$k = \exp \left\{ \sum_{i=0}^6 a_i [\ln(Cv)]^i \right\} \quad (4)$$

para la cual los coeficientes  $a_i$  están definidos en la tabla 6.

Como este método en realidad se basa en el de momentos (Zorraquino, 2004), entonces el parámetro de escala se calcula con la expresión siguiente:

$$\alpha = \frac{k}{1 - e^{-k}} \frac{I_1}{2x} \quad (5)$$

donde la integral  $I_1$  se estima con la fórmula polinomial:

$$I_1 = \exp \left\{ \sum_{i=0}^6 b_i [\ln(k)]^i \right\} \quad (6)$$

para la cual los coeficientes  $b_i$  están definidos en la tabla 6.

### Discusión de los resultados

Los resultados de los ajustes de las distribuciones GVE, LP3 y TERC a los 15 registros procesados del Altiplano Potosino, se han concentrado en la tabla 5. El análisis de contraste cualitativo de estas predicciones y las del método regional adoptado, indica que en las estaciones pluviométricas en que existe presencia de valores dispersos, las distribuciones GVE y LP3 conducen a predicciones muy elevadas con respecto a las estimaciones regionales, no así el modelo TERC. Lo anterior es nota-

ble en Cedral, pero ocurre en todas las estaciones con coeficiente de asimetría cercano o superior a 2.0 (tablas 5 y 1). Por el contrario, en los registros que pueden ser considerados normales debido a que sus coeficientes de asimetría y curtosis se aproximan a cero y 3.0, respectivamente (tabla 1), como lo son Los Pilares, Mexquitic, Reforma y San Luis Potosí, todos los modelos subestiman las predicciones, pero de manera más severa las distribuciones GVE y LP3. En términos generales, la distribución TERC conduce a los resultados más aproximados a los regionales, según se aprecia cualitativamente de la tabla 5 y numéricamente a través de los residuos en la tabla 7.

## Conclusiones

Actualmente se considera que las predicciones obtenidas a través de los métodos regionales son más confiables y más estables; sin embargo estos procedimientos presentan el inconveniente de tener que recabar y procesar todos los registros disponibles en la zona o región estudiada. Además, algunas veces no son tan claras las similitudes estadísticas entre los registros, o no es tan evidente la definición geográfica de la región como en el caso aquí expuesto, teniéndose que recurrir previamente a la aplicación de pruebas de homogeneidad regional. Ante tales inconvenientes se sugiere aplicar el modelo TERC de manera individual al registro procesado para obtener las predicciones que serán las más aproximadas a los valores regionales, ante la dificultad para obtener éstos o cuando existe premura por los resultados. Lo anterior, basado en los resultados de las tablas 5 y 7.

Aunque el modelo TERC tiene el inconveniente de no presentar solución inversa, es decir una ecuación que permita el cálculo de una predicción asociada a una cierta probabilidad de no excedencia, el uso de la ecuación 3 es bastante simple y además la estimación de sus parámetros de ajuste es directa y muy sencilla.

En resumen, la distribución TERC es un modelo probabilístico que siempre se debe probar al procesar registros de precipitación diaria máxima anual, teniendo en mente que será menos sensible a los valores dispersos (*outliers*) y que debido a ello, probablemente conducirá a predicciones más apegadas a los valores regionales, como se ha demostrado para la zona del Altiplano Potosino.

## Referencias

- Bobée B. & Ashkar F. *The Gamma Family and Derived Distributions Applied in Hydrology*. Chapter 7: Log-Pearson type 3 distribution. Colorado, U.S.A. Water Resources Publications. Littleton, 1991. 203 p. pp. 76–120.
- Buishand, T.A. Extreme Rainfall Estimation by Combining Data from Several Sites. *Journal of Hydrological Sciences*, Vol. 36, No. 4–8, pp. 345–365. 1991.
- 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*, 16(2):77–92, abril–junio, 2001.
- Campos-Aranda, D.F. *Análisis probabilístico univariado de datos hidrológicos*. Capítulo 8: Análisis probabilístico con métodos regionales, páginas 133–161. Avances en Hidráulica 13. AMH-IMTA. México, DF. 2006. 172 p.
- Campos-Aranda, D.F. Descripción y aplicación de la distribución TERC para obtener predicciones de precipitación máxima diaria. XX Congreso Nacional de Hidráulica. Tema 3: Hidrología Superficial y Subterránea, Ponencia 3. 15 al 18 de octubre de 2008. Toluca. Estado de México.
- Cunnane C. Methods and Merits of Regional Flood Frequency Analysis. *Journal of Hydrology*, 100:269–290. 1988.
- Dalrymple T. Flood-Frequency Analyses. *Manual of Hydrology (Part 3): Flood-Flow Techniques*, pp. 1–80. U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper 1543-A. U.S.A. 1960.
- Etoh T., Murota A., Nakanishi M. SQRT-Exponential Type Distribution of Maximum. *Hydrologic Frequency Modeling*, edited by V.P. Singh. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht, Holland. 1987. Pp. 253–264.
- Garros-Berthet H. Station-Year Approach: Tool for Estimation of Design Floods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(2):135–160. 1994.
- Instituto Mexicano de Tecnología de Agua (IMTA). *Eric II: Extractor rápido de información climatológica 1920–1998*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-IMTA. Jiutepec, Morelos. Mayo, 2000.
- Nanía L.S. y Gómez V.M. *Ingeniería hidrológica*. Capítulo 7: Estadística Hidrológica, Grupo Editorial Universitario. Granada, España. 2004. 278 p. Pp. 205–232.
- Stedinger J.R., Vogel R.M., Foufoula-Georgiou E. Chapter 18, theme 18.2: Probability Distributions for Extreme Events, 18.10–18.22 and theme 18.8: Frequency Analysis of Storm Rainfall. *Handbook of Hydrology*, editor in chief David R. Maidment. McGraw-Hill, Inc. New York, USA. 1993. Pp. 18.48–18.53.
- Zorraquino J.C. El modelo SQRT-ET<sub>MAX</sub>. *Revista de Obras Públicas*, (3,447):33–37. Madrid, España. Septiembre, 2004.



### **Semblanza del autor**

*Daniel Francisco Campos-Aranda.* Obtuvo el título de ingeniero civil en diciembre de 1972 en la entonces Escuela de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Durante el primer semestre de 1977, realizó en Madrid, España un diplomado en hidrología general y aplicada. Posteriormente, durante 1980–1981, llevó a cabo estudios de maestría en ingeniería en la especialidad de hidráulica en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. En esta misma institución, inició (1984) y concluyó (1987) el doctorado en ingeniería con especialidad en aprovechamientos hidráulicos. Ha publicado artículos principalmente en revistas mexicanas de excelencia: 35 en Ingeniería Hidráulica en México, 12 en Agrociencia y 7 en Ingeniería. Investigación y Tecnología. En congresos internacionales y nacionales ha presentado 24 y 73 ponencias, respectivamente. Fue investigador nacional (nivel I: expediente 7273) desde el 1° de julio de 1991 hasta el 31 de diciembre del 2007. Actualmente es profesor jubilado de la UASLP, desde el 1° de febrero del 2003. En 2008 la AMH le otorgó el premio nacional “Francisco Torres H.” a la práctica profesional de la hidráulica.