

## Estimación probabilística del volumen de acarreo en suspensión en cuencas sin aforos de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa)

### *Probabilistic Estimation of Suspended Sediment Volume in Watersheds Without Hydrometric Data of the Hydrological Region No. 10 (Sinaloa)*

D.F. Campos-Aranda  
Facultad de Ingeniería.  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México.  
E-mail: campos\_aranda@hotmail.com

(Recibido: junio de 2007, aceptado: septiembre de 2008)

#### **Resumen**

Inicialmente se proponen tres acciones para contrarrestar los efectos negativos del cambio climático en los diseños hidrológicos. Además, se destaca la utilidad del análisis regional de datos hidrológicos para obtener procedimientos y fórmulas de estimación de valores de diseño más confiables en cuencas sin aforos. En seguida se describe la información de acarreo en suspensión disponible en la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa) y se cita la que fue utilizada. Se acepta la homogeneidad de la región con base en la relación encontrada entre el volumen de sedimentos promedio anual y el área de cuenca. Posteriormente se describen y aplican tres métodos regionales: (1) el de las estaciones-año, (2) el de los momentos de probabilidad pesada (MPP) regionales y (3) el de los MPP ponderados. Se continúa con la aplicación numérica relativa a la estimación de la capacidad de azolves en tres embalses de la región. Por último, se formulan las conclusiones las cuales destacan las ventajas del enfoque propuesto

**Descriptor:** Sedimentos, análisis regional, momentos de probabilidad pesada, modelo GVE.

#### **Abstract**

Firstly three actions are proposed to mitigate the negative effects of climatic change in the hydrological design. Besides is pointed out the utility of regional analysis of hydrological data to obtain more reliable formulae and procedures for estimating design values in watersheds without hydrometric data. Next, the suspended sediment data available in Hydrological Region number 10 (Sinaloa) is described and the utilized data is cited. The homogeneity of that region was accepted through the relation between watershed area and mean annual suspended sediment volume. Late three regional methods are described and applied, these are: (1) the station-year method, (2) the regional probability weighted moments (PWM) method and (3) the weighted PWM method. Next, the numerical application for sediment capacity estimation in three reservoirs of the region is described. Lastly conclusions are formulated which pointed out the advantages of the proposal approach.

**Keywords:** Sediment, regional analysis, probability weighted moments, GVE distribution.

## Introducción

El cambio climático inminente está generando condiciones meteorológicas más extremas, concretamente tormentas más severas y sequías más prolongadas. Ambas condiciones producirán seguramente, magnitudes más elevadas de la *erosión* de los suelos, debido al mayor poder erosivo de la lluvia y a la menor densidad de cobertura vegetal. En realidad, el poder erosivo de las tormentas severas y la capacidad de transporte de las crecientes que originan, es conocido desde hace décadas, cuando se observó que éstas, en pocas horas, pueden aportar más sedimento que el ocurrido en varios años. Ya que el sedimento transportado por los cauces, es el responsable de la pérdida de almacenamiento de los embalses por sedimentación; surge entonces una pregunta fundamental ¿Cómo mejorar la estimación del volumen destinado a la acumulación de los sedimentos en los embalses o *capacidad de azolves* frente al cambio climático?

En términos generales, ante el cambio climático se deben realizar las siguientes tres acciones: *primera*, por ningún motivo suspender mediciones hidrométricas y climatológicas, ya que ahora resulta fundamental incorporar en ellos los nuevos valores extremos, de manera que las actualizaciones de los estudios hidrológicos reflejen verdaderamente las nuevas condiciones o tendencias climáticas. *Segunda*, debido a que las condiciones meteorológicas están cambiando y por consecuencia las climáticas, actualmente es más imperativo ampliar los puntos de medición, para disponer de valores de apoyo reales en el transporte de información de sitios con registros amplios a estas nuevas localidades con escasez de datos, así como para realizar en el futuro análisis regionales más confiables.

La *tercera* acción para contrarrestar los efectos negativos del cambio climático, consiste en aumentar el grado de confiabilidad de las estimaciones hidrológicas, a través de incrementar el nivel de probabilidad utilizado. Por ejemplo, en lugar de utilizar la *mediana* del volumen anual de sedimentos, o estimación con un 50% de probabilidad de excedencia, ya que en uno de cada dos años tal valor puede ser excedido, se debe emplear el valor que sólo es excedido una vez en tres, cuatro o cinco años, esto es, emplear magnitudes de diseño con probabilidades de no excedencia del 66.7, 75 y 80%, es decir, pedir que en cada 3, 4 ó 5 años únicamente uno presente un valor igual o mayor.

Por otra parte, el *análisis regional* de datos busca relaciones generales y confiables válidas dentro de una región o zona geográfica homogénea, entre la variable de interés en el diseño hidrológico y otra u otras fácilmente

accesibles (Cunnane, 1988). Lógicamente, la utilidad de las relaciones encontradas radica en permitir diseños hidrológicos menos empíricos en cuencas sin aforos.

El análisis regional de datos anuales de acarrees en suspensión que se desarrolla en este trabajo, está orientado a la estimación de los valores de diseño en cuencas sin tales registros, los cuales están asociados a las probabilidades de no excedencia citadas. Por lo anterior, el planteamiento general comprende: (1) la descripción general de la información disponible, así como la selección y presentación de la que será procesada; (2) el desarrollo de los procedimientos regionales que son aplicables y que conducen a las predicciones buscadas y (3) la descripción y contraste de unas aplicaciones prácticas.

## Desarrollo

### Datos disponibles

El transporte o carga de sedimentos de una corriente consta de dos tipos definidos con base en el tamaño de las partículas y la forma de movimiento; el primero se denomina sedimento en suspensión, que es el material fino mantenido en el tirante o lámina de agua por efecto de la turbulencia de la corriente o en suspensión coloidal. El segundo se conoce como transporte de fondo, es el material grueso que se mueve continuamente o de manera intermitente por rodamiento o saltación. Generalmente, varía del 5 al 35% del transporte en suspensión (Morris y Fan, 1998).

De acuerdo al Boletín Hidrológico No. 36 (SRH, 1975) de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), se dispone de un total de 17 estaciones hidrométricas que cuentan con información denominada de *acarrees en suspensión*, expresados en miles de toneladas y de m<sup>3</sup>. Seis de tales estaciones fueron operadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y no se dispone de datos en tres de ellas (La Veranera, Guerachic y Tecusiapa). La estación San Francisco fue operada por la CFE y sus 27 datos anuales utilizados proceden del Tomo VI del boletín citado. Para las trece estaciones restantes, los datos están disponibles en el sistema BANDAS (IMTA, 2003), del cual se recopiló la información general y relativa a sus valores *anuales*, con tales datos se integró la tabla 1. En total se dispuso de 281 valores anuales.

### Datos utilizados y homogeneidad regional

En la tabla 1 se observa que cuatro estaciones hidrométricas tienen registros demasiado cortos menores de 9 años, que en total suman sólo 27 valores anuales, por

ello, se decidió prescindir de tales registros. Con respecto a las estaciones de registro corto ( 15 años), Choix y La Huerta, se decidió eliminar a la segunda, pues su registro corresponde a un periodo de únicamente años secos. Respecto al registro de la estación hidrométrica Palos Blancos, éste abarca hasta 1962, porque en 1963 empezó a operar aguas arriba la presa Adolfo López Mateos (Humaya).

El resto de sólo nueve estaciones hidrométricas con un total 239 valores anuales, los cuales se muestran en la tabla 2, constituye una disponibilidad escasa para realizar un análisis de homogeneidad tendiente a definir subregiones, por lo cual se consideró homogénea la Región Hidrológica No. 10.

Esta región ha sido encontrada homogénea con base en pruebas estadísticas aplicadas a gastos máximos anuales por Campos (1994) y Domínguez (1996). En cambio, Escalante (1998) utilizando el método de las curvas multidimensionales, definió dos subregiones una al Norte integrada por las cuencas de los ríos Fuerte y Sinaloa, la otra al Sur abarca el resto de la región hasta el río Quelite.

En la tabla 3 la llamada aportación de sedimentos media anual (AS) varía de 202.6 a 479.8 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>, este intervalo es bastante reducido de acuerdo a las magnitudes citadas en la literatura especializada (Morris y Fan, 1998) y con ello, se genera cierta confianza con respecto a la homogeneidad de la Región Hidrológica No. 10, en cuanto a volúmenes de acarreo en suspensión. También en la tabla 3 se presentan los principales parámetros físicos de las cuencas de las nueve estaciones hidrométricas que serán utilizadas, tomados de Escalante y Reyes (2002).

### Estimación del VSMA

Al dibujar en un papel logarítmico en las abscisas las áreas de cuenca en km<sup>2</sup> y en las ordenadas los volúmenes de sedimento medio anual en miles de m<sup>3</sup> (figura 1), es decir, las columnas 4 y 3 de la tabla 3, se observa que tales datos definen una relación lineal expresada por la ecuación:

$$VSMA = 0.20186 A^{1.05245} \quad (1)$$

con un coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) de 0.947 y un error estándar de la estimación (EEE) de 667.8 miles de m<sup>3</sup>. Con base en la información de la tabla 3 se pueden plantear diversas regresiones lineales múltiples como las que se citan a continuación:

$$VSMA = 709.2326 + 0.34101 A + 0.81763 PMA \quad (2)$$

con

$$R^2 = 0.941 \quad EEE = 828.6 \text{ miles de m}^3$$

$$VSMA = 1,937.521 + 0.3085 A + 2.808PMA - 22,338.9 Sc \quad (3)$$

con

$$R^2 = 0.944 \quad EEE = 881.6 \text{ miles de m}^3.$$

Como se observa, no se logra mejorar estadísticamente la estimación del VSMA, por lo cual se empleará la ecuación 1 como relación funcional de la Región Hidrológica No. 10, la cual además verifica la homogeneidad hidrológica de ésta (figura 1).

### Método de las estaciones-año

Su objetivo consiste en lograr un mejor ajuste de un modelo probabilístico y sobre todo, unos resultados más confiables al utilizar un registro mucho más amplio, el constituido por todos los valores anuales de las estaciones que integran la zona o región hidrológicamente homogénea. Para suprimir el efecto de escala de cada una de las cuencas, sus datos anuales se estandarizan dividiéndolos entre su media aritmética, por lo anterior 1.000 será la media de la serie integrada.

El ajuste por momentos L de la distribución GVE (Stedinger *et al.*, 1993; Campos, 2006) a la serie integrada, condujo a sus siguientes parámetros:  $u = 0.62378$ ,  $a = 0.41037$  y  $k = -0.26366$ , con las predicciones (X) adimensionales mostradas en la tabla 4.

El valor de X al ser multiplicado por el VSMA estimado con la ecuación 1 conducirá a las magnitudes de diseño.

### Método de los MPP regionales

Con base en los resultados de Varas (2000) y de Campos (2005), es posible el ajuste regional de la distribución GVE mediante momentos L en cuencas sin datos hidrométricos, ya que los momentos de probabilidad pesada (MPP)  $b_1$  y  $b_2$ , pueden ser estimados con base en el  $b_0$  o media aritmética, como se indica a continuación. Se comienza por ordenar en forma decreciente los datos  $x_i$  ( $x_1 > x_2, x_2 > x_3, \dots, x_{n-1} > x_n$ ), después a partir de las expresiones siguientes se calculan los MPP insesgados  $b_i$  (Stedinger *et al.*, 1993), cuyos valores se presentan en la tabla 5.

Tabla 1. Datos generales de las estaciones hidrométricas de la Región Hidrológica Num. 10 (Sinaloa) que cuentan con registro de sólidos en suspensión

Num.	Estación	Clave	Corriente	Cuenca	Area (km <sup>2</sup> )	Periodo (n)	VEMA (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	V SMA (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	% MS	% S <sub>min</sub>	% S <sub>max</sub>
1	Choix	10066	Río Choix	Río Fuerte	1,403	1964-1975 (12)	258,343.6	436.772	0.1688	0.05302	0.25134
2	Chinipas	10064	Río Oteros	Río Fuerte	5,098	1968-1976 (9)	905,048.1	672.304	0.07043	0.01827	0.16192
3	San Francisco	10039	Río San Miguel	Río Fuerte	17,531	1947-1973 (27)	2'555,588.2	5,973.898	0.23376	0.05567	0.62993
4	Huites	10037	Río Fuerte	Río Fuerte	26,020	1942-1979 (37)	3'947,388.9	9,366.460	0.21704	0.09207	0.90282
5	Toahayana	10110	Río Petatlán	Río Sinaloa	5,281	1973-1982 (8)	1'154,848.4	2,843.139	0.24895	0.17943	0.30037
6	Jaina	10036	Río Sinaloa	Río Sinaloa	8,179	1942-1980 (38)	1'274,705.6	3,288.477	0.25773	0.04991	0.44225
7	Guamuchil	10031	Río Mocorito	Río Mocorito	1,645	1961-1965 (5)	135,749.8	942.000	0.69548	0.61220	0.76346
8	La Huerta	10113	Río Humaya	Río Culiacán	6,149	1970-1987 (15)	1'077,712.1	928.589	0.09785	0.01219	0.86460
9	Palos Blancos	10033	Río Humaya	Río Culiacán	11,409	1940-1962 (22)	1'739,598.7	2,311.934	0.12742	0.06644	0.24008
10	Picachos	10026	Río Tamazula	Río Culiacán	3,280	1939-1943 (5)	955,549.0	1,983.186	0.20709	0.18434	0.22431
11	Santa Cruz	10040	Río San Lorenzo	Río San Lorenzo	8,919	1949-1980 (30)	1'662,388.5	2,347.170	0.13659	0.07363	0.20225
12	Acatitán	10070	Río Elota	Río Elota	1,884	1960-1985 (26)	422,058.5	761.463	0.15615	0.06292	0.67185
13	Ixpalino	10065	Río Piaxtla	Río Piaxtla	6,166	1960-1987 (25)	1'479,064.1	2,958.442	0.18412	0.08411	0.46900
14	El Quelite	10083	Río Quelite	Río Quelite	835	1964-1991 (22)	104,162.6	171.374	0.15638	0.02429	0.46851

Simbología:

n	número de datos anuales
VEMA	Volumen Escurrido Medio Anual
V SMA	Volumen de Sedimentos Medio Anual
% MS	porcentaje Medio de Sedimento por volumen
% S <sub>min</sub>	porcentaje de Sedimento anual mínimo por volumen
% S <sub>max</sub>	porcentaje de Sedimento anual máximo por volumen

Tabla 2. Datos anuales de acarreo en suspensión ( $10^3 \text{ m}^3$ ) en las nueve estaciones hidrométricas indicadas de la Región Hidrológica Num. 10 (Sinaloa)

Num.	El Quelite	Choix	Acatitán	Ixpalino	Jaina	Santa Cruz	Palos Balncos	San Francisco	Huites
1	141.620	655.060	580.590	1,171.460	4,132.000	1,425.540	1,425.180	2,662.837	8,144.720
2	236.200	568.030	879.780	2,889.690	678.230	2,095.510	2,773.260	1,569.444	53,134.840
3	24.580	519.920	647.750	1,236.750	1,827.250	860.150	2,529.750	13,396.585	4,280.350
4	38.490	567.420	831.340	2,771.400	2,393.030	1,033.280	2,927.870	2,091.877	2,858.210
5	120.910	542.720	260.730	1,238.430	2,448.400	1,110.020	1,820.160	1,476.037	3,548.330
6	113.950	244.360	168.680	1,211.030	3,965.320	1,652.120	710.890	4,170.926	3,975.100
7	170.630	358.980	1,093.570	3,231.640	8,102.160	3,767.100	2,463.700	4,681.901	24,234.430
8	515.450	547.190	580.930	12,918.480	2,654.120	827.580	2,578.910	6,723.194	3,267.030
9	102.220	369.930	5,116.340	1,940.270	2,076.430	1,931.220	2,759.850	9,752.386	2,072.750
10	109.610	343.350	269.490	3,284.670	1,522.230	1,706.710	3,190.100	3,734.470	4,180.870
11	420.180	420.110	566.510	2,123.510	2,113.830	2,972.860	827.600	2,845.605	4,954.230
12	185.520	104.190	235.230	7,126.430	3,144.390	1,293.660	810.550	19,583.970	5,311.450
13	230.610		1,342.700	2,761.320	5,363.750	3,561.220	2,484.670	10,559.608	6,543.200
14	22.420		365.760	3,497.580	1,870.830	1,669.560	960.660	24,324.450	2,445.100
15	72.840		826.100	1,433.980	1,377.470	1,312.070	2,831.440	5,554.045	2,982.290
16	54.490		374.800	1,993.000	8,627.910	4,002.870	640.500	8,171.561	7,418.330
17	699.360		439.380	1,828.660	3,829.020	2,357.520	610.970	6,952.183	10,783.070
18	6.910		428.340	2,222.420	4,978.960	7,697.990	7,869.130	2,081.015	23,044.530
19	116.990		344.230	1,568.330	4,777.010	847.760	1,444.970	2,025.528	9,665.280
20	170.180		197.090	3,932.380	2,527.430	2,584.880	4,173.710	6,194.788	5,291.020
21	199.350		606.740	5,221.970	5,212.640	1,665.440	3,627.570	3,639.592	9,783.870
22	17.720		1,402.820	641.200	2,183.850	4,014.660	1,401.100	4,487.512	6,424.660
23			109.370	3,464.370	2,445.550	2,786.100		1,192.388	15,238.240
24			428.650	3,151.620	4,958.360	4,462.080		1,327.094	29,727.550
25			459.420	1,100.450	4,201.930	1,045.070		3,495.104	10,625.470
26			1,241.700		3,543.460	1,627.650		6,464.559	15,214.850
27					990.580	2,403.780		2,136.589	3,686.490
28					2,656.510	2,572.000			4,874.130
29					4,687.220	3,038.830			9,486.190
30					4,214.290	2,089.680			9,075.720
31					3,561.800				11,181.060
32					4,744.300				7,671.690
33					1,150.420				5,070.060
34					3,513.130				3,551.330
35					2,385.630				3,034.000
36					2,346.520				6,391.460
37					2,968.640				7,387.120
38					787.530				

Tabla 3. Características fisiográficas de las cuencas de estaciones hidrométricas seleccionadas de la Región Hidrológica Num. 10 (Sinaloa) que tienen registro de sólidos en suspensión

Num.	Estación	VSMA (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	A (km <sup>2</sup> )	AS (m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	PMA (mm)	Sc	Em (m.s.n.m)	L <sub>cp</sub> (km)	S <sub>cp</sub>	Pf (km/km <sup>2</sup> )	D <sub>c</sub> (1/km <sup>2</sup> )	D <sub>d</sub> (km/km <sup>2</sup> )
1	El Quelite	171.374	885	205.238	720.1	0.0084	211.7	42	0.00579	0.1653	0.0515	0.0096
2	Choix	436.772	1,403	311.313	972.1	0.0221	1,050.0	82	0.00234	0.1447	0.0513	0.0050
3	Acatitán	761.463	1,884	404.174	1,046.6	0.0497	726.9	115	0.01131	0.1131	0.0215	0.0080
4	Ixpalino	2,958.442	6,166	479.799 <sup>m</sup>	1,006.7	0.0430	1,393.7	174	0.01310	0.0592	0.0264	0.0070
5	Jaina	3,288.477	8,179	402.063	982.6	0.0518	1,279.2	177	0.01014	0.0560	0.0241	0.0056
6	Santa Cruz	2,347.170	8,919	263.165	1,068.9	0.0532	1,689.6	180	0.01267	0.0561	0.0202	0.0085
7	Palos Blancos	2,311.934	11,409	202.641 <sup>m</sup>	982.3	0.0434	1,563.3	256	0.00649	0.0508	0.0210	0.0031
8	San Francisco	5,973.898	17,531	340.762	773.5	0.0504	2,015.7	246	0.00720	0.0379	0.0131	0.0058
9	Huites	9,366.460	26,020	359.972	822.8	0.0493	1,912.9	267	0.00685	0.0324	0.0097	0.0051

Simbología:

VSMA	Volumen de Sedimentos Medio Anual.
A	Area de cuenca.
AS	Aportación de sedimentos media anual.
M	Máxima.
m	Mínima.
PMA	Precipitación Media Anual.
S <sub>c</sub>	Pendiente promedio de la cuenca.
Em	Elevación media de la cuenca.
L <sub>cp</sub>	Longitud del colector principal.
S <sub>cp</sub>	Pendiente promedio del colector principal.
P <sub>f</sub>	Parámetro de forma o índice de Gravelius.
D <sub>c</sub>	Densidad de corrientes (número total de corrientes entre A)
D <sub>d</sub>	Densidad de drenaje (longitud total de corrientes entre A)



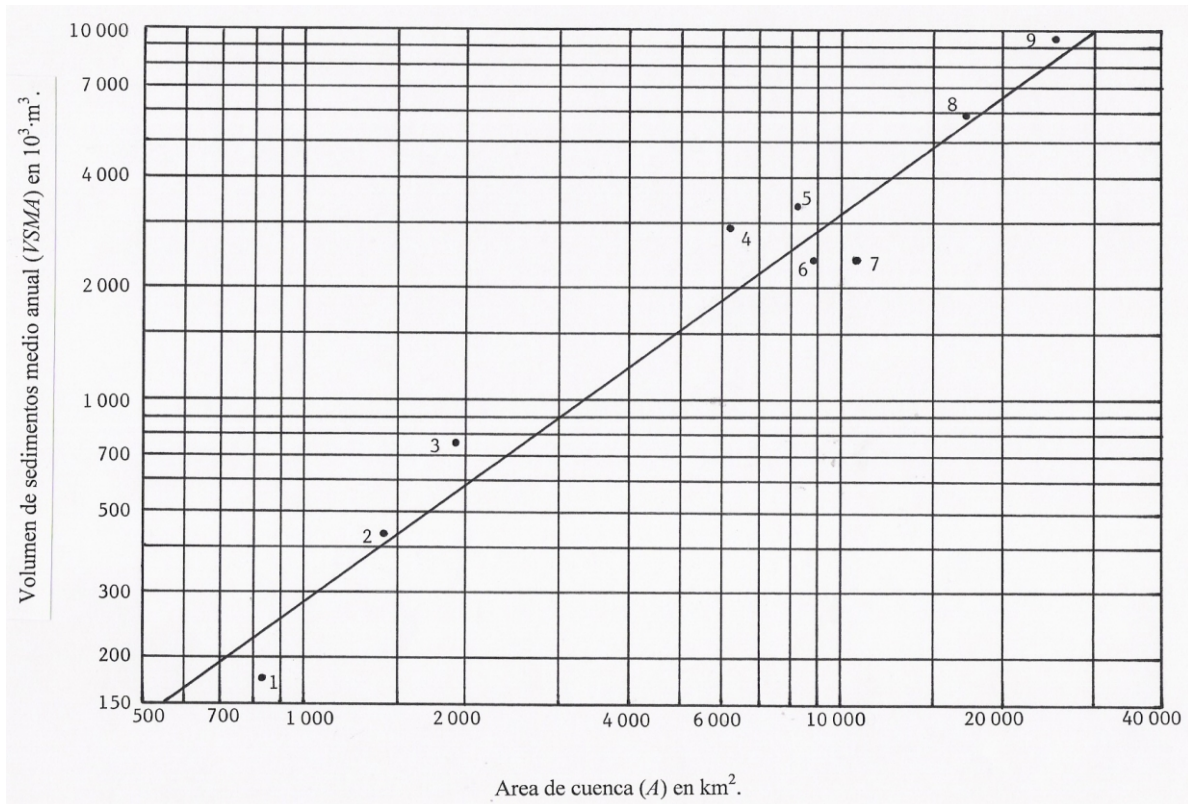


Figura 1. Relación entre el volumen de sedimentos medio anual (VSMA) en miles de m<sup>3</sup> y el área de cuenca (A) en km<sup>2</sup> en la Región Hidrológica Num. 10 (Sinaloa)

Tabla 4. Predicciones adimensionales asociadas a las probabilidades indicadas obtenidas con el método regional citado

Método regional:	Probabilidad de no excedencia en %				
	50	66.7	75	80	90
Estaciones - años	0.782	1.042	1.229	1.379	1.885
MPP ponderados	0.808	1.061	1.239	1.380	1.847

$$b_0 = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4) \quad b_1 = 80.64551 - 0.72831 b_0 \quad (7)$$

$$b_1 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (n-i)x_i \quad (5) \quad \text{con} \quad R^2 = 0.9982 \quad \text{EEE} = 97.1 \text{ miles de m}^3$$

$$b_2 = \frac{1}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n (n-i)(n-i-1)x_i \quad (6) \quad b_2 = 47.53955 - 0.82385 b_1 \quad (8)$$

con base en tales valores, se buscaron relaciones lineales  $b_{i+1} = a + m \cdot b_i$  y se obtuvieron:

$$\text{con} \quad R^2 = 0.9993 \quad \text{EEE} = 50.4 \text{ miles de m}^3.$$

Tabla 5. Momentos de probabilidad pesada muestrales ( $b_j$ ) insesgados y sesgados ponderados

Num.	Estación	insesgados		n	sesgados					
		$b_0$	$b_1$		$b_2$	$b_1$	$b_4/b_0$	$b_1'$	$b_2$	$b_2/b_0$
1	El Quelite	171.374	128.878	105.823	22	125.746	0.06754	101.379	0.59157	0.05445
2	Choix	456.772	264.220	188.447	12	254.941	0.02951	178.636	0.40899	0.02054
3	Acatitán	761.463	562.614	468.025	26	551.225	0.07875	450.916	0.59217	0.06442
4	Ixpalino	2,958.442	2,049.278	1,637.974	25	2,008.725	0.07102	1,581.016	0.53441	0.05590
5	Jaina	3,288.477	2,132.868	1,612.649	38	2,107.029	0.10187	1,580.754	0.48069	0.07643
6	Santa Cruz	2,347.170	1,546.420	1,191.939	30	1,522.256	0.08141	1,160.422	0.49439	0.06206
7	Palos Blancos	2,311.934	1,569.628	1,217.427	22	1,535.062	0.06112	1,172.806	0.50728	0.04670
8	San Francisco	5,973.899	4,357.398	3,556.554	27	4,273.451	0.08081	3,436.336	0.57522	0.06498
9	Huites	9,366.461	6,775.899	5,565.476	37	6,681.368	0.11043	5,426.100	0.57931	0.08968
	Sumas	-	-	-	239	-	0.68226	-	4.76403	0.53516
	Promedios	-	-	-	26.6	-	0.67803	-	0.52934	-

Tabla 6. Capacidades de Azolves (CA) estimadas con probabilidades de no excedencia del 50% y 80%, con base en los métodos regionales indicados

Presas o embalse	Capacidad de Azolves de proyecto ( $Mm^3$ )	Area de cuenca ( $km^2$ )	VSMA ( $10^6$ m [ec.1])	/MEA		/MMP regionales		/MMP ponderados	
				CA ( $Mm^3$ ) 50%	CA ( $Mm^3$ ) 80%	CA ( $Mm^3$ ) 50%	CA ( $Mm^3$ ) 80%	CA ( $Mm^3$ ) 50%	CA ( $Mm^3$ ) 80%
Guamuchil	35.0	1,630	484.901	20.856	36.777	na	na	21.549	36.804
Sanalona	40.0	3,250	1,002.448	43.115	76.031	51.920	78.342	44.549	76.086
Humaya	135.0	10,972	3,607.184	155.145	273.587	145.013	263.285	160.303	273.785

Simbología:

/MEA Método de las estaciones - años

/MMP Método de los Momentos de Probabilidad Ponderada

na no aplicable



Entonces, a partir de la ecuación 1 se estima  $VSMA = b_0$  y con las ecuaciones 7 y 8 se obtienen  $b_1$  y  $b_2$  para calcular los momentos L y hacer el ajuste de la distribución GVE (Stedinger *et al.*, 1993; Campos, 2006), con la cual se obtienen las predicciones  $X$ , o volúmenes de sedimentos en suspensión ( $10^3 \cdot m^3$ ) asociados a las probabilidades de no excedencia citadas.

### Método de los MPP ponderados

Los valores de los estimadores sesgados de los MPP ( $b_r^*$ ) se obtienen a partir del registro ordenado en magnitudes decrecientes ( $x_i$ ) con la expresión siguiente (Stedinger *et al.*, 1993):

$$b_r^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \left( \frac{i-0.35}{n} \right)^r \quad (9)$$

después, se estandarizan dividiéndolos entre  $b_0$  (media aritmética) y posteriormente se ponderan con base en la amplitud ( $n_i$ ) de cada registro del cual proceden ( $l = 1, 2, \dots, 9$ ) esto es:

$$(b_r^*)^p = \frac{b_r^*}{b_0} (n_i / \dots), \quad (10)$$

es su suma, es decir 239. También en la tabla 5 se presentan los MPP sesgados estandarizados y su ponderación. Con base en los valores  $(b_0^*)^p = 1.00000$ ,  $(b_1^*)^p = 0.68226$  y  $(b_2^*)^p = 0.53516$  se ajusta la distribución GVE por momentos L (Stedinger *et al.*, 1993; Campos, 2006) para obtener:  $u = 0.65257$ ,  $a = 0.40797$  y  $k = -0.22462$ , así como las predicciones adimensionales ( $X$ ) citadas en la tabla 4. El procedimiento de aplicación es idéntico al del método de las estaciones-años.

### Otros métodos regionales

Los procedimientos regionales basados en un periodo común de datos (Campos, 2006), no fueron aplicables debido a la discrepancia en el inicio y final de cada registro de datos (tabla 1).

### Aplicaciones numéricas

Del Razo (1999) indica que las presas Eustaquio Buelna (Guamuchil), Adolfo López Mateos (Humaya) y Sanalona de la Región Hidrológica No. 10, requieren modificaciones; por ello se revisarán sus valores de proyecto en

cuanto a capacidad de azolves, aceptando que su vida útil (VU) sea de 50 años y que por transporte de fondo se incrementará un 10%. Entonces la capacidad de azolves (CA) en  $Mm^3$  (millones de  $m^3$ ) será igual a:

$$CA = 1.10 \cdot X \cdot VU \quad (11)$$

en la cual,  $X$  es la predicción del volumen de sedimentos anual en  $Mm^3$  con la probabilidad de no excedencia seleccionada. Por ejemplo, para la Presa Guamuchil con un área de cuenca de  $1,630 \text{ km}^2$ , la ecuación 1 conduce a un valor del  $VSMA = 484.901$  miles de  $m^3$ , de manera que el método de las estaciones-años con predicciones adimensionales de 0.782 y 1.379 para el 50 y 80% de probabilidad de no excedencia conduce a valores de  $X$  igual a 379.193 y 668.678 miles de  $m^3$ , para tales probabilidades. Entonces la capacidad de azolves según práctica actual usando la mediana y el enfoque propuesto serán:

$$CA = 1.10 (379.193 / 1,000) 50 = 20.856 \text{ Mm}^3$$

$$CA = 1.10 (668.678 / 1,000) 50 = 36.777 \text{ Mm}^3$$

En la tabla 6 se presentan los datos y resultados obtenidos con los tres métodos regionales expuestos. Se concluye que las capacidades de azolves de *proyecto* corresponden al orden de magnitud cuando se emplea la mediana, con un valor sobrado en la presa Guamuchil y uno escaso en Humaya. Sin embargo, cuando se utiliza la probabilidad de no excedencia del 80%, únicamente en la presa Guamuchil su estimación de CA está correcta y en las otras dos es bastante reducida, llegando solamente al 52 y 50% en Sanalona y Humaya.

### Conclusiones

Se han expuesto los procedimientos de los métodos regionales que fueron susceptibles de aplicar en los nueve registros seleccionados de acarreo en suspensión, disponibles en la Región Hidrológica No. 10 para la estimación en cuencas sin aforos de predicciones de diseño con menor riesgo de ser excedidas, que las comúnmente utilizadas, correspondientes a la media aritmética o la mediana.

La similitud numérica de los resultados mostrados en la tabla 6 para las estimaciones de la capacidad de azolves, destacan la confiabilidad de los métodos regionales.

Se recomienda continuar este tipo de análisis en otras regiones hidrológicas o geográficas, para disponer de mejores técnicas de estimación de valores de diseño del volumen de acarreo en suspensión, en este caso,

con menor riesgo de ser excedidos y calcular con ello, *capacidades de azolves* más confiables.

### Referencias

- Campos-Aranda D.F. Aplicación del método del índice de crecientes en la región hidrológica número 10, Sinaloa. *Ingeniería Hidráulica en México*, IX(3):41–55, septiembre–diciembre de 1994.
- Campos-Aranda D.F. Predicciones de volúmenes de sólidos en suspensión en cuencas sin aforos en la Región Hidrológica No. 25 (San Fernando–Soto La Marina). *Tlaloc*, (33):22–28, enero-abril del 2005.
- Campos-Aranda D.F. *Análisis probabilístico univariado de datos hidrológicos*. Tema 6.6: Distribución General de Valores Extremos, pp. 99–102, Cap. 8: Análisis probabilístico con métodos regionales, pp. 133–161. Avances en Hidráulica 13. AMH–IMTA. México, DF. 2006. 172 p.
- Cunnane, C. Methods and Merits of Regional Flood Frequency Analysis. *Journal of Hydrology*, 100:269–290. 1988.
- Del Razo V. Rehabilitación y/o modificación de presas, pp. 43–62. En: *El desarrollo de las presas en México*, Editores Arreguín F.I., Herrera C., Marengo H. y Paz Soldán G.A. Avances en Hidráulica 5. AMH–IMTA. México DF. 1999. 224 p.
- Domínguez E.J.Y. Selección de estaciones hidrométricas homogéneas de una región hidrológica. XIV Congreso Nacional de Hidráulica. Tomo I, ponencia 20. Acapulco, Guerrero. Octubre de 1996.
- Escalante S.C. Multivariate Extreme Value Distribution with Mixed Gumbel Marginals. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(2):321–333, 1998.
- Escalante S.C. y Reyes Chávez L. *Técnicas estadísticas en hidrología*. Apéndice A, pp. 291–298. Facultad de Ingeniería de la UNAM. México DF. 2002. 298 p.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)*. 8 CD's. Volumen 1. Región III: Pacífico Norte. CNA–SEMARNAT. Jiutepec, Morelos. 2003.
- Morris, G.L., Fan J. *Reservoir Sedimentation Handbook*. Chapter 5: Sediment properties, pp.5.1–5.28 and chapter 7: Sediment yield from watersheds, pp 7.1–7.44. McGraw–Hill Companies, Inc. New York, USA. 1998.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). *Actualización al Boletín Hidrológico Num. 36*. (Región Hidrológica Num. 10. Sinaloa. Tomo VI. Periodo 1970–1973). Subsecretaría de Planeación. México DF. 1975.
- Stedinger J.R., Vogel R.M., Foufoula–Georgiou E. Frequency Analysis of Extreme Events. Chapter 18, pp. 18.1–18.66 in *Handbook of Hydrology*, editor in chief David R. Maidment. McGraw–Hill, Inc. New York, USA. 1993.
- Varas E. Estimación de momentos ponderados regionales de caudales máximos diarios. *Ingeniería Hidráulica en México*. XV(1):51–61, enero–abril de 2000.

---

### Semblanza del autor

*Daniel Francisco Campos-Aranda*. Es ingeniero civil con maestría y doctorado en ingeniería por la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Inició su actividad profesional en la Secretaría de Recursos Hidráulicos en junio de 1972 y la concluyó en diciembre de 1990 en la Comisión Nacional del Agua. Ha publicado 31 artículos en la revista *Ingeniería Hidráulica en México*, 9 en *Agrociencia* y 9 en *Tlaloc*, es autor del texto *Introducción a los Métodos Numéricos*, publicado por la Editorial Universitaria Potosina en 2003 y de los libros: *Agroclimatología Cuantitativa de Cultivos*, publicado por Editorial Trillas en 2005 y *Análisis Probabilístico Univariado de Datos Hidrológicos* publicado por la AMH–IMTA en 2006. En enero del 2007, publicó el texto *Estimación y Aprovechamiento del Esguerramiento*. Fue investigador nacional (nivel I: expediente 7273) desde julio de 1991 hasta el diciembre del 2007. Desde el 2003 es profesor Jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. En 2008 recibió el premio nacional "Francisco Torres H." que otorga la AMH.