

Caracterización hidrológica de crecientes en la cuenca baja del río Pánuco con base en niveles máximos anuales

Daniel Francisco Campos Aranda

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Se presenta un análisis de contraste de cinco funciones de distribución de probabilidades para determinar la más conveniente a los registros de niveles máximos anuales; se describe la estimación del periodo de retorno correspondiente a la denominada escala crítica (nivel de inicio de los problemas de inundación) de cada población asociada a una estación hidrométrica; se muestran los periodos de retorno de los niveles máximos observados en los treinta registros utilizados en este estudio; y se estima la periodicidad o recurrencia de las crecientes más severas que han ocurrido en la cuenca baja del río Pánuco. Se formulan como conclusiones la aceptación o conveniencia de la distribución General de Valores Extremos, GVE, y la alta periodicidad que tienen los niveles de las escalas críticas, fluctuando de dos a 13 años, al igual que las crecientes más severas, cuyo intervalo varía de cinco a 45 años. Como resultados adicionales del primer análisis se incluyen las magnitudes de los niveles máximos asociados a diversos periodos de retorno, lo cual permite diseñar o revisar la infraestructura de protección contra crecientes.

Palabras clave: río Pánuco, crecientes, análisis probabilísticos, distribución GVE, periodos de retorno de diseño.

Introducción

Uso de los niveles máximos anuales

Es común que los grandes ríos, antes de descargar al mar, circulen por las llanuras costeras y establezcan planicies de inundación, que se caracterizan hidráulicamente por dos tipos de flujos:

- El que ocurre en la planicie o llanura de inundación cuando el río se desborda como consecuencia de sus crecientes
- El que se presenta en el propio cauce que se modifica constantemente, llegando a cortar sus meandros

La presencia de los flujos citados ocasiona que la medición de los gastos que transitan por el río en las épocas de estiaje y sobre todo en las de crecientes, sea sumamente incierta, o en el mejor de los casos aproximada.

El diseño y la construcción de las obras de protección contra las crecientes deben realizarse en la planicie de inundación, por lo que resulta de vital importancia la definición de los niveles máximos, principalmente anuales, alcanzados por el río, ya que esta información es mucho más confiable al tener un error de medición menor. Entonces, el diseño hidrológico se realiza a través del procesamiento probabilístico de niveles máximos anuales, con la idea de asociar a los periodos de retorno comúnmente empleados en esta infraestructura de protección, con el nivel máximo correspondiente.

Conviene aclarar que para el caso particular del río Pánuco, la información de niveles máximos anuales disponibles no es totalmente homogénea desde un punto de vista estadístico, ya que incluye los efectos de las diferentes obras de infraestructura que se han realizado en su cuenca y sobre todo en su planicie de inundación. Esto implica que no habrá que esperar una congruencia absoluta en los resultados o en su mutua comparación.

Cuenca baja del río Pánuco

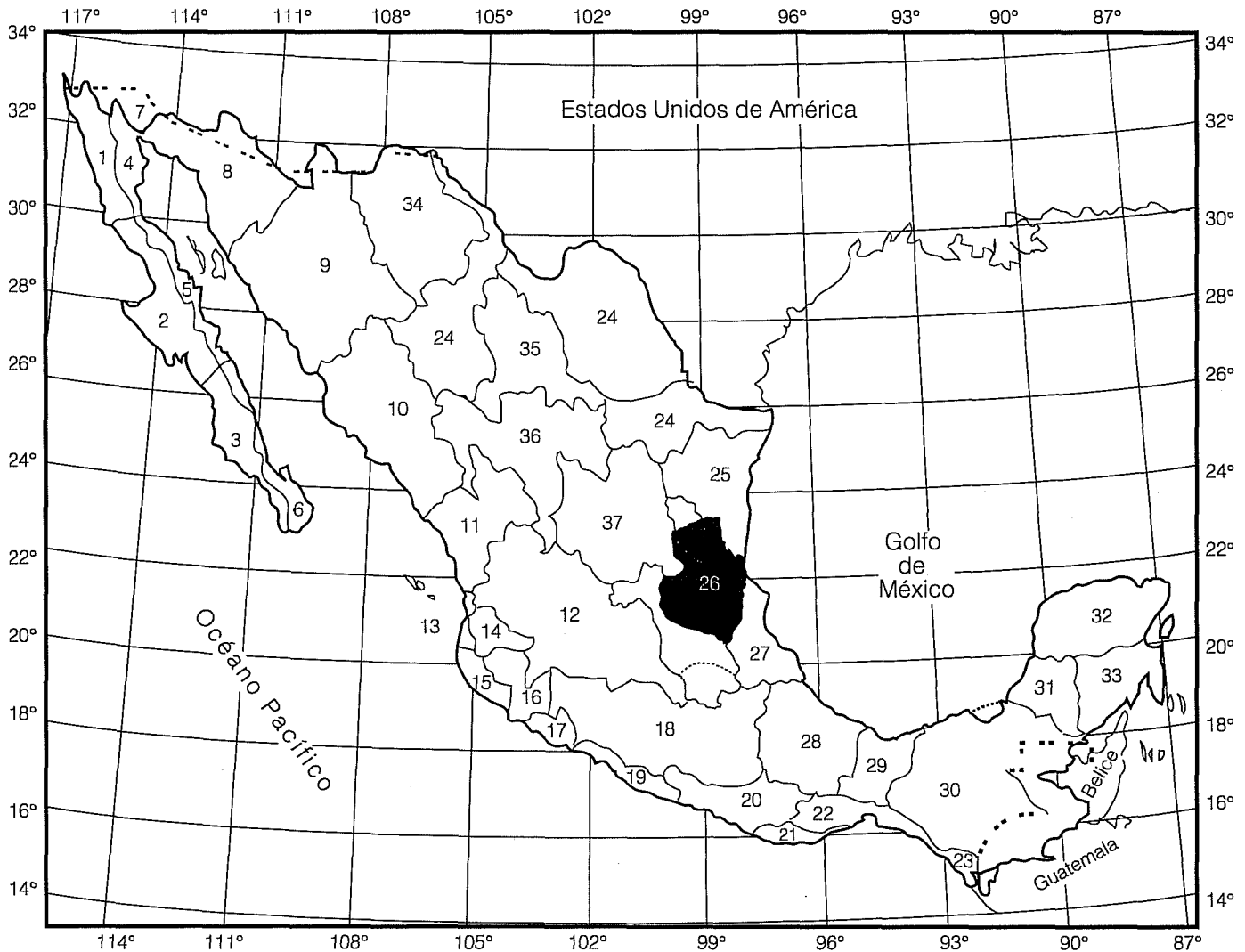
La cuenca del río Pánuco, que drena 84 956 km² (SRH, 1970), comprende parte de nueve estados, desde Puebla y el Estado de México en el sur, hasta Tamaulipas y Nuevo León en el norte; la cuenca baja se ubica dentro de la planicie costera del golfo de México y abarca unos 25 000 km² distribuidos entre los estados de Tamaulipas, San Luis Potosí y Veracruz, principalmente.

Los afluentes más importantes del río Pánuco en su cuenca baja son el Moctezuma y el Tempoal que se unen frente al poblado de El Higo, Veracruz, la unión del primero con el Tampaón en Las Adjuntas forma el río Pánuco, que después de la ciudad de Pánuco recibe por la margen derecha al río Chicayán y por la mar-

gen izquierda al río Guayalejo o al Tamesí, después de su sistema lagunario, al inicio de la zona conurbada de Tampico-Madero-Altamira en Tamaulipas y Pueblo Viejo en Veracruz. La localización en la República Mexicana de la cuenca del río Pánuco o Región Hidrológica Núm. 26, se muestra en la ilustración 1 (SRH, 1970).

Después de la creciente de 1955 que inundó Tampico, se fue instalando una red de estaciones hidrométricas y de niveles, así como climatológicas. Actualmente se dispone de más de cincuenta estaciones de lecturas de escala en la cuenca baja del río Pánuco y recientemente se instaló una red telemétrica para dar seguimiento a los fenómenos hidrometeorológicos y pronosticar niveles en las poblaciones ribereñas importantes.

1. Localización geográfica de la Región Hidrológica Núm. 26 (Pánuco) y de la cuenca baja del río Pánuco



Periodos de retorno a considerar

Por otra parte, al analizar las recomendaciones actuales de la Comisión Nacional del Agua, CNA, para los periodos de retorno de diseño en las diversas obras de infraestructura hidráulica, de comunicaciones y de protección a zonas urbanas y productivas (GASIR, 1994), se consideró conveniente, para cubrir las necesidades de diseño, estimar los niveles máximos anuales asociados a los siguientes ocho periodos de retorno: 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500 y 1 000 años.

Información disponible y su procesamiento

Niveles máximos anuales

Con base en toda la información proporcionada por las gerencias estatales de la CNA en Tamaulipas, Veracruz y San Luis Potosí, se integró una muestra de treinta estaciones hidrométricas de medición de niveles, en las que se utilizaron los registros más confiables y completos, por ello en su mayoría corresponden a sitios de ubicación de estaciones de aforos. Los niveles máxi-

1. Niveles máximos anuales (m) en diez estaciones de la cuenca baja del río Pánuco

Año	Pánuco 1955-1993	Las Adjuntas 1955-1993	Tamuín 1958-1993	El Pujal 1955-1993	Tansabaca 1958-1993	Santa Rosa 1958-1993	Ballesmi 1955-1991	El Olivo 1967-1993	El Higo 1955-1993	San Vicente T. 1972-1993
1955	9.12	22.08	(25.18)	16.14			8.80		16.72	
1956	(6.07)	14.75	(21.31)	9.10			6.48		17.43	
1957	(2.49)	9.07	(16.48)	5.26			4.95		7.12	
1958	7.61	17.38	23.67	10.85	187.25	5.20	6.48		14.70	
1959	(4.05)	11.54	(17.16)	5.72	177.15	3.40	4.85		SD	
1960	(3.37)	10.47	(18.30)	6.54	175.76	2.40	5.36		SD	
1961	(5.25)	13.44	(19.68)	7.62	178.73	3.80	5.95		SD	
1962	(3.21)	10.21	(16.73)	5.43	175.74	2.56	4.76		SD	
1963	(6.16)	14.88	(20.44)	8.28	176.94	4.56	6.06		SD	
1964	(3.50)	10.67	(16.17)	5.06	176.20	1.74	4.90		SD	
1965	(4.36)	12.03	(19.35)	7.35	176.62	2.75	5.48		SD	
1966	6.88	16.53	22.50	10.56	181.10	6.60	6.82		22.18	
1967	7.89	16.88	24.06	12.10	185.90	5.50	6.16	21.46	22.44	
1968	5.00	13.64	(19.00)	7.07	179.10	4.30	5.43	17.65	18.36	
1969	8.16	17.24	24.29	12.63	186.54	6.20	6.39	22.20	23.03	
1970	6.94	16.37	(23.21)	11.29	183.10	4.40	6.44	20.67	21.43	
1971	6.55	15.18	(20.61)	8.43	178.92	3.74	5.63	19.48	SD	
1972	6.38	14.66	(21.52)	9.31	177.94	3.10	6.37	18.08	18.60	5.45
1973	6.68	15.16	22.16	10.32	181.82	5.01	6.11	19.08	19.44	7.92
1974	8.40	18.02	24.54	13.74	187.90	7.10	7.07	23.54	24.50	12.00
1975	9.04	18.27	24.23	12.42	186.58	4.08	7.06	23.54	24.35	11.27
1976	8.28	17.57	24.71	14.14	188.70	8.95	7.23	20.98	21.38	7.30
1977	4.61	11.96	22.16	10.68	177.40	7.70	4.92	12.84	SD	3.56
1978	7.20	17.10	23.18	11.81	186.22	3.32	7.04	22.78	23.71	11.00
1979	6.61	15.64	20.08	7.61	178.96	2.86	6.06	20.60	21.19	8.90
1980	5.87	14.82	19.93	7.82	177.40	2.25	6.33	19.62	SD	7.70
1981	6.82	15.85	21.44	8.49	179.75	2.93	6.73	21.18	21.70	9.02
1982	1.38	7.72	16.06	4.92	176.03	1.09	3.94	11.79	SD	2.42
1983	5.89	14.80	21.50	9.40	177.50	4.02	5.86	19.15	SD	5.88
1984	8.18	17.90	23.16	11.08	182.92	3.86	6.43	23.12	23.92	10.06
1985	6.67	15.76	20.38	8.24	177.20	3.42	6.18	20.68	SD	6.38
1986	3.90	11.28	18.80	7.22	175.28	3.40	6.03	14.54	SD	4.31
1987	5.93	14.90	19.45	7.54	176.22	2.60	6.04	19.70	SD	5.47
1988	7.01	17.29	22.04	10.57	184.78	5.74	6.96	22.84	23.74	9.92
1989	3.94	10.96	17.68	6.25	176.13	3.20	5.80	15.23	SD	5.38
1990	7.09	17.84	23.16	12.88	186.00	5.75	6.78	23.28	24.40	12.36
1991	7.90	18.02	24.17	SD	184.04	6.90	7.40	23.25	24.30	9.95
1992	6.72	15.63	21.82	10.69	177.56	6.55	SD	20.53	21.16	6.77
1993	8.76	19.27	24.81	14.70	192.40	7.97	SD	24.44	25.34	9.56

Las cifras en *negritas* corresponden a valores superiores a la media más la desviación estándar de cada registro.

2. Niveles máximos anuales (m) en diez estaciones de la cuenca baja del río Pánuco

Año	Tierra Blanca 1959-1993	Temamatla 1960-1993	Requetemu 1955-1993	Tempoal 1955-1993	Platón Sánchez 1978-1993	Terrerillos 1960-1993	Los Hules 1960-1993	Río Frío 1960-1993	San Gabriel 1955-1993	Magiscatzín 1955-1993
1955			9.46	24.52					8.60	34.34
1956			7.48	22.12					2.59	27.64
1957			3.62	4.72					2.59	21.70
1958			6.66	20.12					2.96	22.96
1959	139.78		3.60	11.12					2.64	26.78
1960	138.92	116.30	3.36	10.00		89.17	3.12	3.77	2.60	22.73
1961	139.60	116.24	3.88	8.06		89.42	3.25	7.15	3.12	26.71
1962	138.84	116.04	3.70	6.62		89.46	3.15	7.98	4.16	28.04
1963	139.50	116.50	4.08	15.70		90.40	3.94	3.84	2.64	22.17
1964	139.34	115.80	5.16	8.07		88.98	2.90	3.54	2.48	22.82
1965	139.95	116.84	3.00	9.05		89.79	3.31	6.20	2.70	24.49
1966	139.78	116.10	5.67	17.32		90.62	3.98	12.08	8.00	31.36
1967	141.90	118.14	6.64	17.18		90.12	4.09	6.28	4.73	27.26
1968	140.65	118.14	6.10	12.07		89.97	4.26	6.62	2.44	24.41
1969	141.78	119.70	5.80	17.48		92.56	4.80	5.90	2.82	23.54
1970	140.58	117.20	5.05	15.26		91.10	4.10	10.62	5.91	31.48
1971	140.86	117.87	6.40	14.24		91.22	4.50	9.73	2.96	29.34
1972	139.54	115.37	4.19	11.02		89.60	4.70	9.60	5.05	29.15
1973	141.66	117.04	4.38	13.78		91.81	4.00	8.06	3.58	30.54
1974	142.05	120.64	8.94	22.52		94.37	6.60	5.57	3.00	24.75
1975	142.30	119.36	7.35	22.02		92.15	5.11	7.35	4.05	27.04
1976	141.22	115.58	5.46	14.10		89.65	3.12	14.89	7.30	35.55
1977	139.06	114.34	2.76	5.62		88.44	2.64	11.30	7.45	31.34
1978	141.25	119.38	10.47	21.28	15.06	93.12	5.48	5.66	4.00	25.30
1979	141.12	120.17	6.00	18.80	8.53	90.44	3.70	6.23	3.56	24.17
1980	140.11	118.15	5.63	13.53	9.01	91.23	3.08	3.83	3.74	22.30
1981	141.28	118.83	5.08	17.32	13.32	92.43	4.54	5.66	4.96	25.05
1982	139.53	114.51	2.72	6.08	5.20	90.03	2.26	3.69	4.11	22.23
1983	139.80	115.70	5.66	11.53	7.56	90.46	2.84	6.28	6.40	25.14
1984	141.08	120.05	6.32	22.30	18.06	93.82	5.66	4.45	6.44	23.33
1985	140.01	115.93	4.28	17.35	12.75	91.28	3.24	6.65	3.52	25.67
1986	138.90	114.07	3.36	6.43	4.12	89.45	1.94	5.22	3.78	23.65
1987	139.39	115.88	2.70	16.16	13.16	92.88	4.28	8.70	3.67	27.64
1988	141.80	119.45	7.52	19.93	16.63	93.91	6.15	5.24	6.43	24.68
1989	139.90	114.99	4.26	8.28	6.80	90.98	3.31	5.62	3.42	25.50
1990	142.16	121.90	9.40	23.27	19.56	96.62	8.00	4.00	5.00	22.94
1991	141.36	118.92	6.40	21.53	15.66	93.43	4.75	8.16	5.01	28.11
1992	139.95	116.54	3.98	16.99	12.18	91.62	3.27	10.20	3.58	29.87
1993	143.00	117.20	10.48	23.26	18.30	94.66	5.17	11.92	8.20	32.64

Las cifras en *negritas* corresponden a valores superiores a la media más la desviación estándar de cada registro.

mos anuales disponibles en cada una de las treinta estaciones hidrométricas se presentan en los cuadros 1, 2 y 3, y en la ilustración 2 se muestra su ubicación.

Estimación de valores faltantes

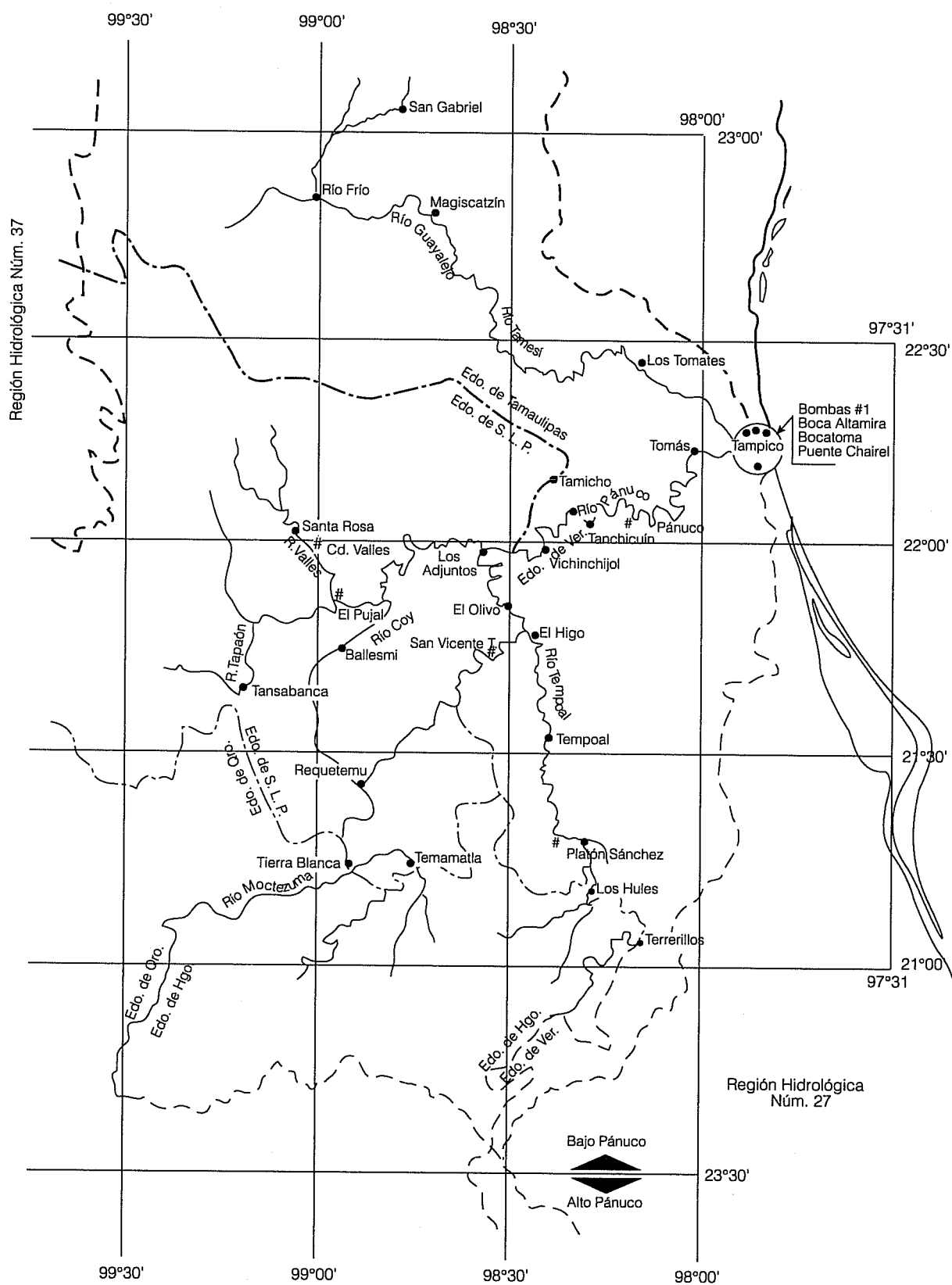
Se realizaron cinco análisis de regresión para completar registros, los valores estimados se indican entre paréntesis en los cuadros 1, 2 y 3; tales análisis fueron:

- Pánuco-Las Adjuntas, para el periodo común de treinta años se obtuvo un coeficiente de correlación lineal (R_{xy}) de 0.964; después de eliminar los tres

puntos más dispersos se alcanzó un $R_{xy} = 0.983$, con la ecuación de regresión: $P = -3.243 + 0.632 LA$

- Vichinchijol-Las Adjuntas, para el número total de parejas de datos de 17 se encontró $R_{xy} = 0.952$ y al eliminar tres datos se llegó a un $R_{xy} = 0.987$, con la ecuación siguiente: $V = -0.314 + 0.903 LA$
- Tamicho Arriba-Las Adjuntas, para todos los 27 datos comunes disponibles se calculó $R_{xy} = 0.944$ y después de retirar dos datos dispersos se encontró un $R_{xy} = 0.990$, con la ecuación de regresión: $TMA = 0.495 + 0.662 LA$
- Tanchicuín Arriba-Las Adjuntas, con el periodo común de valores de 28 se dedujo un $R_{xy} = 0.950$,

2. Localización de las estaciones hidrométricas de niveles en la cuenca baja del río Pánuco



3. Niveles máximos anuales (m) en diez estaciones de la cuenca baja del río Pánuco

Año	Tamesí 1959-1993	Tomates 1960-1993	Vichinchijol 1955-1993	Tamicho 1955-1993	Tanchicuín 1978-1993	Tamós 1960-1993	Bombas N° 1 1960-1993	Boca Altamira 1960-1993	Bocatoma 1955-1993	Puente Chairel 1955-1993
1955			(19.62)	(15.12)	(14.27)		5.85			
1956			(13.00)	(10.27)	(8.98)		SD			
1957			(7.87)	(6.50)	(4.89)		SD			
1958			(15.38)	(12.01)	(10.88)		1.17			
1959			(10.10)	(8.14)	(6.67)		SD			
1960			(9.14)	(7.43)	(5.90)		SD			
1961			(11.82)	(9.40)	(8.04)		SD			
1962			(8.90)	(7.26)	(5.71)		SD			
1963			(13.12)	(10.35)	(9.08)		SD			
1964			(9.32)	(7.56)	(6.04)		SD			
1965			(10.55)	(8.46)	7.01		SD			
1966			(14.61)	11.18	10.04	1.56	0.96	2.15	1.56	
1967		3.33	(14.93)	11.55	10.64	2.58	1.67	2.61	2.41	2.28
1968		2.59	(12.00)	9.52	9.50	SD	0.50	SD	SD	SD
1969		3.12	(15.25)	11.76	10.99	2.28	1.21	1.95	1.73	1.55
1970		3.60	(14.47)	11.24	10.98	SD	0.94	SD	SD	1.10
1971		2.58	(13.39)	10.60	9.46	SD	0.80	SD	1.14	0.82
1972		3.60	(12.92)	10.26	9.00	1.09	0.51	SD	1.25	0.53
1973	10.03	3.71	(13.37)	10.66	9.46	1.55	0.91	2.28	1.54	1.22
1974	7.34	3.37	15.99	12.13	11.02	1.94	1.04	2.00	1.44	1.22
1975	6.30	3.18	16.25	12.72	11.60	3.16	1.32	1.97	1.73	1.59
1976	12.24	5.21	15.69	12.16	10.72	2.95	1.55	4.09	3.17	2.80
1977	8.15	3.55	10.88	8.32	6.90	0.74	0.58	1.76	1.20	SD
1978	4.70	2.68	15.46	11.88	10.58	1.15	SD	1.66	1.18	0.78
1979	4.78	2.70	13.76	10.96	9.44	1.02	0.96	1.71	1.26	SD
1980	2.15	1.75	13.00	10.30	8.92	SD	0.98	1.11	1.18	SD
1981	5.09	2.96	14.30	11.38	10.10	SD	0.90	1.47	1.38	SD
1982	2.15	2.07	6.18	4.30	3.40	SD	0.56	0.98	1.14	SD
1983	5.41	2.94	13.98	10.40	6.72	SD	SD	1.62	1.31	SD
1984	5.34	3.06	(15.85)	12.36	11.29	2.32	1.44	1.98	1.65	1.61
1985	5.31	2.92	13.76	11.12	9.96	SD	SD	SD	1.31	SD
1986	3.34	2.50	6.46	7.64	6.60	SD	SD	1.56	1.29	SD
1987	6.31	3.05	(13.14)	10.50	9.35	SD	SD	1.71	1.46	SD
1988	5.80	3.30	13.44	11.96	10.64	1.32	0.97	1.67	1.49	0.97
1989	4.20	2.75	7.54	3.49	6.49	SD	SD	SD	1.30	SD
1990	4.48	2.98	15.10	12.16	10.79	1.34	0.76	SD	1.43	0.96
1991	7.60	5.28	15.48	12.30	10.92	1.82	1.24	2.23	1.47	1.45
1992	7.32	3.63	13.50	11.18	8.70	1.06	0.68	1.65	1.48	0.85
1993	9.45	3.98	(17.08)	(13.26)	(12.24)	2.93	1.87	2.70	2.39	2.38

Las cifras en *negritas* corresponden a valores superiores a la media más la desviación estándar de cada registro.

el cual se elevó hasta 0.989 al eliminar tres datos dispersos, con una ecuación de regresión de: $TNA = -1.650 + 0.721 LA$

- Tamuín-El Pujal, en este caso los 24 datos comunes definen una regresión curva, con cuyos 22 valores se obtuvo $R_{xy} = 0.988$ y el siguiente polinomio de grado 2: $T = 6.743 + 2.193 EP - 0.0651 EP^2$

Parámetros estadísticos básicos

En el cuadro 4 se muestran las características estadísticas de los 35 registros de niveles máximos anuales que serán procesados, incluyendo el número de datos, el periodo de registro, la media aritmética, la *moda*, la

desviación estándar y los coeficientes de asimetría en los dominios real y logarítmico.

La *moda* (quizá la información estadística aquí manejada de mayor importancia o impacto práctico ya que representa el valor más frecuente del nivel en cada estación) se obtuvo con base en los parámetros de forma y escala de la función de probabilidades Pearson tipo III, comúnmente conocida como distribución *Gamma* incompleta (Kottegoda, 1980; INEGI, 1984; Campos, 1988).

Tal vez el parámetro estadístico más importante es el coeficiente de asimetría que indica el sentido y magnitud del sesgo que presentan los datos. En general, según se observa en el cuadro 4 la mitad de los regis-

tros presentan valores positivos indicando con esto una mayor cantidad de niveles bajos con escasez de grandes magnitudes y la otra mitad tiene coeficientes de asimetría negativos, esto es, predominio de niveles altos. De estos últimos registros, los cuatro originales de las estaciones Pánuco, Vichinchijol, Tamicho Arriba y Tanchicuín Arriba tienen grandes valores de coeficiente de asimetría, tal vez ya muestren los efectos de la infraestructura de protección contra inundaciones que se ha venido contruyendo en las márgenes y planicie del río Pánuco.

Procesamiento probabilístico de contraste

Para el orden de magnitud de los periodos de retorno necesarios para caracterizar las crecientes de la cuenca baja del río Pánuco, de dos a mil años, práctica-

mente cualquier modelo de función de distribución de probabilidades, FDP, conducirá a resultados similares, sobre todo en los registros más largos y con menos valores disparados (*outliers*). El análisis probabilístico de los niveles máximos anuales se llevó a cabo por medio del ajuste de las cinco FDP siguientes:

- Gumbel (Jenkinson, 1969; Clarke, 1973; Kite, 1977; Greis y Wood, 1981)
- General de Valores Extremos o GVE (Jenkinson, 1969; Raynal, 1984a,b; Campos, 1991)
- Log-Normal de dos y tres parámetros (Chow, 1964; NERC, 1975)
- Pearson tipo III (Thom, 1971; Kottegoda, 1980; Campos, 1988)
- Log-Pearson tipo III (Bobeé, 1975; WRC, 1977; Wallis y Wood, 1985)

4. Parámetros estadísticos básicos de las treinta localidades de registro de niveles máximos anuales analizadas

Estación:	Número de datos	Periodo (años)	Media aritmética	Moda	Desviación estándar	Coeficiente de asimetría	Coeficiente de asimetría logarítmico
1 Pánuco	28	1966-1993	6.60	5.97	1.67	-1.233	-3.718286
1' Pánuco	39	1955-1993	6.15	5.39	1.90	-0.575	-1.988904
2 Las Adjuntas	39	1955-1993	14.94	14.25	3.10	-0.361	-1.092071
3 Tamuín	25	1958-1993	22.00	21.74	2.33	-0.898	-1.532947
3' Tamuín	39	1955-1993	21.16	20.80	2.66	-0.371	-0.689876
4 El Pujal	38	1955-1993	9.45	8.57	2.89	0.336	-0.272654
5 Tansabaca	36	1958-1993	180.77	180.32	4.69	0.713	0.841668
6 Santa Rosa	36	1958-1993	4.41	3.60	1.89	0.593	-0.603981
7 Ballesmi	37	1955-1991	6.14	6.00	0.91	0.138	-0.607073
8 El Olivo	27	1967-1993	20.08	19.47	3.31	-1.084	-1.929269
9 El Higo	19	1966-1993	22.38	22.14	2.05	-0.592	-1.081909
10 San Vicente T.	22	1972-1993	7.85	6.72	2.79	-0.155	-1.366378
11 Tierra Blanca	35	1959-1993	140.51	140.50	1.13	1.728	0.391984
12 Temamatla	34	1960-1993	117.32	117.30	1.98	0.300	0.468417
13 Requetemu	39	1955-1993	5.56	4.82	2.12	0.771	0.080526
14 Tempool	39	1955-1993	15.05	12.41	5.83	-0.153	-0.907654
15 Platón Sánchez	16	1978-1993	12.24	10.05	4.88	-0.181	-1.225630
16 Terrillos	34	1960-1993	91.33	91.30	1.91	0.832	0.973856
17 Los Hules	34	1960-1993	4.09	3.72	1.28	0.973	0.072648
18 Río Frío	34	1960-1993	7.12	6.12	2.81	0.888	0.181928
19 San Gabriel	39	1955-1993	4.36	3.74	1.78	0.993	0.611999
20 Magiscatzín	39	1955-1993	26.52	26.09	3.59	0.759	0.650505
21 Tamesí	21	1973-1993	6.07	5.04	2.50	0.681	-0.821111
22 Tomates	27	1967-1993	3.20	3.03	0.77	1.101	0.095130
23 Vichinchijol	17	1974-1992	12.99	11.97	3.27	-1.292	-2.347644
23' Vichinchijol	39	1955-1993	12.99	12.18	3.02	-0.568	-1.412203
24 Tamicho Arriba	27	1966-1992	10.52	9.80	2.24	-2.122	-3.606545
24' Tamicho Arriba	39	1955-1993	10.25	9.54	2.38	-0.947	-2.342785
25 Tanchicuín Arriba	28	1965-1992	9.33	8.82	1.92	-1.378	-2.945188
25' Tanchicuín Arriba	39	1955-1993	9.07	8.42	2.28	-0.418	-1.463950
26 Tamús	17	1966-1993	1.81	1.51	0.76	0.464	-0.118572
27 Bombas # 1	22	1966-1993	1.02	0.88	0.38	0.649	-0.120768
28 Boca Altamira	21	1966-1993	1.95	1.77	0.65	1.816	0.482875
29 Bocatoma	26	1966-1993	1.53	1.43	0.46	2.327	2.215019
30 Puente Chairel	16	1967-1993	1.38	1.13	0.64	0.955	0.129389

Para evaluar la conveniencia estadística entre la FDP Gumbel y la GVE, que incluye los modelos Fréchet y Weibull, se aplicaron dos pruebas estadísticas, la primera de Van Montfort (1970), detecta la conveniencia del modelo Gumbel ante la distribución Fréchet, a través de la estadística R . La segunda prueba debida a Otten y Van Montfort (1978), contrasta a la distribución Gumbel frente a los modelos Fréchet y Weibull por medio de la estadística A .

La estadística A de la segunda prueba requiere dos arreglos de coeficientes (D y m) los cuales únicamente dependen del tamaño de la muestra n , cuyos datos x_i han sido previamente ordenados de menor a mayor ($x_1 < x_2 < \dots < x_n$), entonces:

$$D_i = \ln \{-\ln [(i - 0.50)/(n + 1)]\} \text{ con: } i = 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

$$D = \sum D_i / (n - 1) \quad SD = \sum (D_i - D)^2 / (n - 1) \quad (2-3)$$

$$m_i = -\ln \{-\ln [i/(n + 1)]\} \text{ con: } i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$l_i = (x_i - x_{i-1}) / (m_i - m_{i-1}) \text{ con: } i = 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

$$A = [(\sum l_i D_i / \sum l_i) - D] / (SD / n)^{1/2} \quad (6)$$

todas las sumatorias $\sum$ abarcan de 2 a n . Para la primera prueba su estadística R corresponde al coeficiente de correlación entre $-D_i$ y l_i con $i = 2, 3, \dots, n$ (Otten & Van Montfort, 1978); por lo tanto sus expresiones operativas son las siguientes (Sevruk y Geiger, 1981), previo arreglo de x_i en orden decreciente (x_1 el mayor y x_n el menor):

$$X_i = x_{i+1} - x_i \quad Y_i = y_{i+1} - y_i \quad (7-8)$$

y_i se evalúa con la ecuación siguiente:

$$y_i = -\ln [-\ln (1 - 1/Tr_i)] \quad (9)$$

utilizando $Tr_i = (n + 1) / i$, también se calcula $y_{i+1/2}$ utilizando $Tr_{i+1/2} = (n + 1) / (i + 1/2)$ e incluyendo $S1 = \sum y_{i+1/2}$; $S2 = \sum (y_{i+1/2})^2$ y $S3 = \sum l_i (y_{i+1/2})$, con l_i igual a:

$$l_i = X_i / Y_i \quad (10)$$

l_i son los pasos; además se calculan $S4 = \sum l_i$ y $S5 = \sum (l_i)^2$. Finalmente se tiene que:

$$R = \{S3 - [S4 * S1/(n-1)]\} / \{[S5 - (S4)^2/(n-1)] / [S2 - (S1)^2/(n-1)]\} \quad (11)$$

Los valores críticos (Ac y Rc) están definidos en función del tamaño de la muestra (n) y del nivel de significancia (α) utilizado en la prueba, comúnmente el 5%. Los valores críticos para Ac se tienen en Otten y Van Montfort (1978) en forma tabular, en cambio, para Rc , Van Montfort (1970) presenta una relación gráfica de la cual se tomaron los valores siguientes:

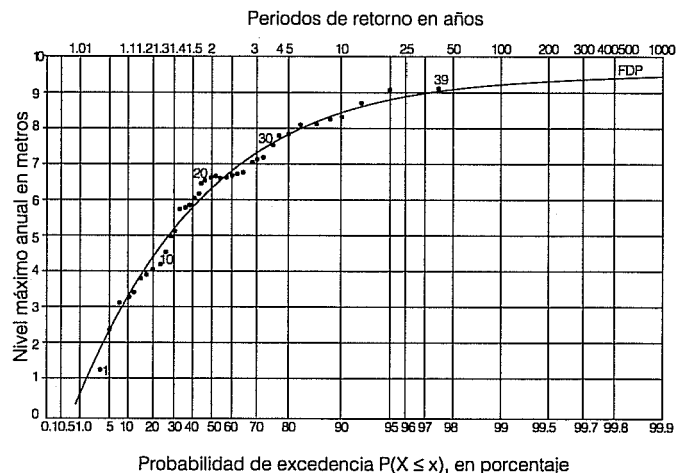
	Fréchet	Fréchet	Weibull
$n = 10$	$Rc = 0.56$	$Ac = -1.72$	$Ac = 1.43$
$n = 15$	$Rc = 0.46$		
$n = 20$	$Rc = 0.40$		
$n = 25$	$Rc = 0.35$	$Ac = -1.83$	$Ac = 1.39$
$n = 30$	$Rc = 0.33$		
$n = 40$	$Rc = 0.28$		
$n = 50$	$Rc = 0.26$	$Ac = -1.87$	$Ac = 1.37$
$n = 100$	$Rc = 0.18$	$Ac = -1.89$	$Ac = 1.31$

Con $A (-)$ menor que Ac se acepta la FDP Fréchet y con $A (+)$ mayor que Ac se acepta la FDP Weibull; en cambio cuando R es menor que Rc se acepta la FDP Gumbel, en caso contrario se debe adoptar una FDP Fréchet. Los resultados de estas pruebas han sido concentrados en el cuadro 5 conjuntamente con los valores obtenidos para el error estándar del ajuste, EEA, de cada modelo definido (Kite, 1977) como:

$$EEA = [\sum (X_o - X_c)^2 / (n - np)]^{1/2} \quad (12)$$

en donde la sumatoria abarca de uno al número total de datos (n), X_o es el dato o nivel máximo anual observado ordenado de menor a mayor, X_c es el valor o nivel

3. Ajuste de la distribución de probabilidades GVE en la estación Pánuco. Periodo analizado: 1995-1993 (N = 39)



5. Resultados de las pruebas estadísticas y bondad de los ajustes probabilísticos contrastados

Estación:	Estadísticas:		FDP ¹ adecuada:				Error estándar de ajuste (EEA) de la FDP:				
	R	Rc	A	Ac	Gumbel F ²	Weibull	Gumbel	GVE ³	LN2 ó LN3 ⁴	Pearson III	Log-Pearson III
Pánuco (28)			3.530	1.385		xxx	0.782(mo)	0.410(mp)	1.067(mm)	0.789(mv)	0.534(mor)
Pánuco (39)			3.060	1.374		xxx	0.695(mp)	0.235(mp)	0.884(mm)	0.645(mv)	0.359(mol)
Las Adjuntas			2.510	1.374		xxx	1.052(mp)	0.590(mo)	0.896(mm)	0.859(mv)	0.680(mol)
Tamuín (25)			3.092	1.390		xxx	1.027(mp)	0.289(mp)	0.761(mm)	0.790(mv)	0.535(mol)
Tamuín (39)			2.422	1.374		xxx	0.918(mp)	0.333(mp)	0.623(mm)	0.640(mv)	0.486(mol)
El Pujal			0.616	1.375	xxx		0.415(mv)	0.305(mp)	0.372(mo)	0.401(mv)	0.378(mol)
Tansabaca	0.160	0.299	-0.979	-1.855	xxx		1.108(sx)	1.188(sx)	1.247(mo)	1.401(mv)	1.113(mol)
Santa Rosa			0.312	1.376	xxx		0.226(sx)	0.250(mp)	0.264(mm)	0.277(mv)	0.282(mol)
Ballesmi			1.833	1.376		xxx	0.255(sx)	0.217(mv)	0.210(mo)	0.232(mv)	0.235(mor)
El Olivo			3.297	1.387		xxx	1.578(mp)	0.589(mp)	1.368(mm)	1.321(mv)	0.858(mol)
El Higo			2.018	1.403		xxx	0.798(sx)	0.401(mp)	0.596(mm)	0.630(mv)	0.530(mol)
San Vicente T.			1.556	1.396		xxx	0.731(sx)	0.332(mp)	0.811(mm)	0.653(mv)	0.482(mol)
Tierra Blanca			0.432	1.377	xxx		0.236(mp)	0.202(mp)	0.220(mo)	0.232(mv)	0.216(mol)
Temamatla			0.529	1.378	xxx		0.311(sx)	0.270(mp)	0.310(mo)	0.368(mv)	0.315(mol)
Requetemu	0.044	0.288	-0.316	-1.860	xxx		0.305(sx)	0.368(sx)	0.349(mm)	0.397(mv)	0.348(mol)
Tempoal			1.863	1.374		xxx	1.801(mp)	0.902(mp)	2.238(mm)	1.642(mv)	1.163(mol)
Platón Sánchez			1.198	1.410	xxx		1.355(mv)	0.793(mp)	1.571(mm)	1.329(mv)	1.007(mol)
Terrerillos	0.105	0.308	-0.403	-1.851	xxx		0.205(sx)	0.272(sx)	0.322(mo)	0.448(mv)	0.279(mol)
Los Hules	0.037	0.308	-0.204	-1.851	xxx		0.172(sx)	0.220(sx)	0.224(mo)	0.279(mv)	0.210(mor)
Río Frío	0.139	0.308	-0.790	-1.851	xxx		0.370(sx)	0.445(mv)	0.474(mm)	0.564(mv)	0.427(mol)
San Gabriel	0.191	0.288	-1.524	-1.860	xxx		0.384(sx)	0.518(mo)	0.438(mm)	0.465(mv)	0.389(mor)
Magiscatzín	0.096	0.288	-0.544	-1.860	xxx		0.412(sx)	0.536(sx)	0.603(mo)	0.743(mv)	0.503(mol)
Tamesí			0.100	1.398	xxx		0.393(sx)	0.464(mp)	0.403(mm)	0.513(mv)	0.549(mor)
Tomates			0.297	1.387	xxx		0.212(mv)	0.236(mp)	0.219(mo)	0.255(mv)	0.235(mor)
Vichinchijol (17)			2.885	1.408		xxx	1.871(mo)	1.052(mp)	1.951(mm)	1.759(mv)	1.178(mol)
Vichinchijol (39)			2.800	1.374		xxx	1.151(mp)	0.592(mp)	1.096(mm)	0.990(mv)	0.708(mol)
Tamicho (27)			4.657	1.387		xxx	1.474(mp)	0.658(mp)	1.826(mm)	1.535(mv)	0.832(mol)
Tamicho (39)			3.606	1.374		xxx	1.054(mo)	0.489(mp)	1.152(mm)	0.974(mv)	0.663(mol)
Tanchiculn (28)			3.927	1.385		xxx	1.039(mp)	0.432(mp)	1.095(mm)	0.960(mv)	0.626(mol)
Tanchiculn (39)			2.701	1.374		xxx	0.821(mp)	0.465(mp)	0.804(mm)	0.712(mv)	0.542(mol)
Tamós			0.093	1.408	xxx		0.160(sx)	0.168(mp)	0.184(mo)	0.188(mv)	0.182(mol)
Bombas # 1	0.041	0.380	-0.154	-1.816	xxx		0.054(sx)	0.064(mp)	0.067(mm)	0.078(mv)	0.068(mol)
Boca Altamira	0.172	0.389	-0.839	-1.811	xxx		0.233(mo)	0.233(mp)	0.201(mo)	0.269(mv)	0.231(mor)
Bocatoma	0.451	0.350	-3.340	-1.831		xxx	0.196(sx)	0.141(mv)	0.213(mo)	0.231(mv)	0.158(mol)
Puente Chairel	0.144	0.444	-0.552	-1.782	xxx		0.133(sx)	0.171(mv)	0.165(mm)	0.181(mv)	0.153(mol)

Simbología:	1	Función de Distribución de Probabilidades	mo	método de momentos
	2	Distribución Fréchet	mp	método de <i>mo</i> de probabilidad pesada
	3	Distribución General de Valores Extremos	mv	método de máxima verosimilitud
	4	Distribuciones Log-normal de 2 y 3 parámetros	sx	método de sextiles
	mol	método de <i>mo</i> en el dominio logarítmico	mm	métodos de <i>mo</i> y <i>mv</i> en la FDP LN2
	mor	método de <i>mo</i> en el dominio real	mo3	método de <i>mo</i> en la FDP LN3

calculado con el modelo para la misma probabilidad de no excedencia asignada a cada dato, con base en la fórmula de Weibull (Benson, 1962):

$$P(X < x) = m / (n + 1) \quad (13)$$

en la cual, *m* es el número de orden (1 para el menor y *n* para el mayor); finalmente *np* es el número de parámetros de la FDP utilizada (*np* = 2 para los modelos Gumbel, Log-Normal de dos parámetros y Pearson tipo III y *np* = 3 para la GVE, Log-Normal de tres parámetros y Log-Pearson tipo III).

El estudio de los resultados concentrados en el cuadro 5 conduce a formular la siguiente conclusión

general: de acuerdo a los valores obtenidos para el EEA, las FDP más convenientes resultan ser los modelos GVE y Gumbel, en completa correspondencia con los resultados de las pruebas citadas. En segundo término la distribución Pearson tipo III resulta la más conveniente por su consistencia para generar un buen ajuste. Con la idea de mostrar gráficamente lo anterior, en las ilustraciones 3 y 4 se presentan los ajustes GVE en Pánuco y el Gumbel en Bombas #1.

Es importante destacar el seguimiento de distribuciones que se observa en el cuadro 5, inicialmente para el modelo Weibull en las estaciones del río Pánuco y sitios bajos de sus colectores y después del modelo Gumbel en las estaciones de la zona alta, del

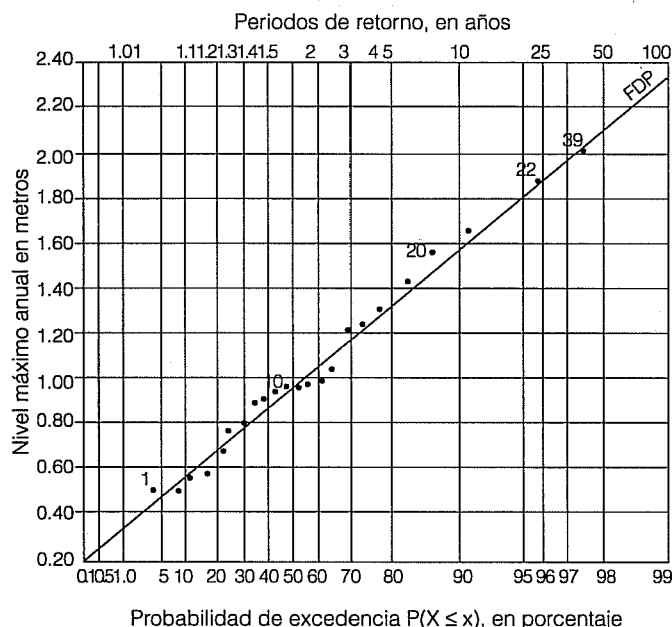
6. Niveles máximos (m) asociados a los periodos de retorno (años) indicados obtenidos con cinco distribuciones de probabilidad

Estación:	FDP ¹	EEA ²	Tr = 2	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 20	Tr = 50	Tr = 100	Tr = 500	Tr = 1000
1 Pánuco (28)	GUM	0.782	6.32	7.80	8.78	9.72	10.94	11.85	13.95	14.86
	GVE	0.410	6.93	8.04	8.42	8.65	8.81	8.89	8.97	8.98
	LN2	1.067	6.28	8.51	9.97	11.36	13.17	14.53	17.72	19.13
	P3	0.789	6.39	8.22	9.31	10.28	11.45	12.27	14.06	14.80
	LP3	0.534	6.88	8.03	8.42	8.63	8.78	8.83	8.86	8.87
2 Pánuco (39)	GUM	0.695	5.82	7.59	8.76	9.88	11.33	12.42	14.93	16.01
	GVE	0.235	6.41	7.88	8.45	8.83	9.14	9.29	9.47	9.52
	LN2	0.884	5.78	8.02	9.52	10.97	12.87	14.31	17.75	19.28
	P3	0.645	5.90	7.85	9.02	10.08	11.36	12.27	14.26	15.08
	LP3	0.359	6.49	7.84	8.25	8.44	8.55	8.57	8.58	8.59
3 Tamuín (25)	GUM	1.027	21.60	23.74	25.16	26.52	28.28	29.60	32.65	33.96
	GVE	0.289	22.51	24.09	24.62	24.92	25.14	25.23	25.33	25.35
	LN2	0.761	21.87	23.99	25.17	26.20	27.40	28.23	30.00	30.70
	P3	0.790	21.91	23.95	25.07	26.03	27.13	27.87	29.43	30.05
	LP3	0.535	22.46	23.97	24.49	24.81	25.06	25.17	25.28	25.30
4 Tamuín (39)	GUM	0.918	20.69	23.21	24.88	26.47	28.55	30.10	33.68	35.22
	GVE	0.333	21.43	23.61	24.53	25.15	25.70	25.98	26.36	26.46
	LN2	0.623	20.99	23.39	24.75	25.94	27.34	28.32	30.40	31.24
	P3	0.640	21.04	23.37	24.66	25.76	27.04	27.91	29.74	30.46
	LP3	0.486	21.30	23.46	24.49	25.28	26.11	26.61	27.54	27.85
5 El Higo	GUM	0.798	22.00	24.02	25.35	26.63	28.29	29.54	32.41	33.64
	GVE	0.401	22.71	24.26	24.85	25.22	25.52	25.66	25.82	25.86
	LN2	0.596	22.28	24.08	25.08	25.93	26.92	27.61	29.05	29.62
	P3	0.630	22.32	24.07	25.02	25.83	26.76	27.39	28.70	29.21
	LP3	0.530	22.66	24.14	24.75	25.18	25.57	25.79	26.13	26.23
6 San Vicente T.	GUM	0.731	7.33	10.08	11.90	13.65	15.92	17.61	21.53	23.22
	GVE	0.332	7.94	10.40	11.56	12.43	13.27	13.75	14.49	14.70
	LN2	0.811	7.29	10.28	12.31	14.29	16.89	18.88	23.67	25.81
	P3	0.653	7.47	10.16	11.81	13.29	15.10	16.40	19.24	20.42
	LP3	0.482	7.98	10.31	11.31	11.98	12.57	12.86	13.25	13.33
7 Tempoal	GUM	1.801	14.01	19.56	23.24	26.76	31.33	34.75	42.65	46.04
	GVE	0.902	15.31	20.36	22.72	24.44	26.09	27.00	28.40	28.79
	LN2	2.238	13.75	20.09	24.50	28.86	34.70	39.23	50.31	55.35
	P3	1.642	14.18	19.89	23.43	26.65	30.61	33.46	39.74	42.35
	LP3	1.163	14.71	20.26	23.18	25.49	27.92	29.41	32.05	32.92
8 Bombas # 1	GUM	0.054	0.95	1.32	1.56	1.80	2.10	2.33	2.86	3.09
	GVE	0.064	0.95	1.30	1.53	1.74	2.01	2.21	2.65	2.84
	LN2	0.067	0.95	1.29	1.52	1.74	2.02	2.23	2.73	2.95
	P3	0.078	0.97	1.30	1.50	1.68	1.90	2.05	2.39	2.53
	LP3	0.068	0.96	1.31	1.53	1.74	2.01	2.20	2.65	2.85

1 Función de Distribución de Probabilidades

2 Error estándar de ajuste

4. Ajuste de la distribución de probabilidades Gumbel en la estación Bombas # 1 periodo analizado: 1966-1993 ($n = 22$)



río Guayalejo y salida del río Pánuco. Con muy pocas excepciones, el mejor método de ajuste de la distribución GVE fue el de momentos de probabilidad pesada (Raynal, 1984b) y con respecto al modelo Gumbel el mejor procedimiento de ajuste correspondió al de sex-tilos (Jenkinson, 1969; Clarke, 1973).

Resultados asociados a los periodos de retorno

Para ilustrar los resultados obtenidos con cada una de las cinco distribuciones de probabilidad utilizadas, en el cuadro 6 se han concentrado sus valores en seis estaciones hidrométricas asociadas a las poblaciones más importantes con problemas de inundación de la cuenca baja del río Pánuco.

Un análisis general de las magnitudes del cuadro 6 permite indicar que las cinco FDP conducen a valores dentro del mismo orden de magnitud para cada uno de los ocho periodos de retorno. Lógicamente las mayores discrepancias se tienen en los grandes periodos de retorno (> 100 años), pero afortunadamente en los menores los resultados son bastante estables, como se puede observar para el periodo de retorno de diez años, que es fundamental en los análisis regionales.

En el cuadro 7 se han concentrado los valores de niveles máximos anuales asociados a los periodos de retorno adoptados, obtenidos a través de las FDP que condujeron a los menores errores estándar del ajuste.

Análisis probabilístico por subperiodos

Planteamiento general

De acuerdo a la evolución constructiva que han tenido las diversas obras de infraestructura de protección contra las crecientes del río Pánuco en el tramo Las Adjuntas-Pánuco, así como el desarrollo que ha presentado la construcción de carreteras, se pueden definir los siguientes subperiodos:

- De 1955 a 1958 sin obras importantes
- De 1959 a 1965 inicia construcción de las obras más importantes
- De 1966 a 1975 están presentes las obras más importantes
- De 1976 a 1993 se realizan adecuaciones a las obras más importantes

Al tomar en cuenta los subperiodos anteriores y sobre todo la información disponible de escalas o niveles máximos anuales en las estaciones hidrométricas del tramo citado (Vichinchijol, Tamicho Arriba, Tanchicuín Arriba y Pánuco) es posible y conveniente definir dos subperiodos para análisis probabilístico, de 1966 a 1975 y de 1976 a 1993.

Este segundo tipo de análisis probabilístico de los niveles máximos anuales por subperiodos, para asociarles un periodo de retorno, se llevó a cabo únicamente con base en las distribuciones Gumbel y GVE seleccionada la más conveniente por medio de las pruebas antes citadas.

Resultados numéricos y comentarios

En el cuadro 7 se han incluido los niveles máximos obtenidos en cada uno de los dos subperiodos citados, para las estaciones Pánuco y Vichinchijol, por ser las más representativas. Al analizar estos resultados se puede indicar que se tiene una gran consistencia de resultados para los bajos periodos de retorno (dos, cinco y diez años); en cambio para los mayores periodos de retorno, prácticamente en todos los casos el segundo subperiodo conduce a valores más altos, esto es lógico ya que los niveles máximos observados corresponden a 1976, 1984 o 1993 (cuadros 1, 2 y 3), y ahora quedan asignados a periodos menores de retorno muestrales, por tener el subperiodo II una amplitud de registro de sólo 18 años.

Probablemente estos resultados ya destacan de una forma sutil los efectos de la infraestructura construida en las márgenes o planicies de inundación del río Pánuco en el tramo Las Adjuntas-Pánuco y por ello,

7. Niveles máximos anuales (m) asociados a los periodos de retorno indicados en años

Estación:	FDP ¹	Tr = 2	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 20	Tr = 50	Tr = 100	Tr = 500	Tr = 1000
1 Pánuco (28)	W	6.93	8.04	8.42	8.65	8.81	8.89	8.97	8.98
1' Pánuco (39)	W	6.41	7.88	8.45	8.83	9.14	9.29	9.47	9.52
1" Pánuco (excedencias)		7.88	8.36	8.72	9.08	9.55	9.91	10.75	11.11
1''' Pánuco (I)	W	7.18	8.25	8.79	9.22	9.65	9.91	10.35	10.49
1''' Pánuco (II)	W	6.69	7.88	8.26	8.47	8.62	8.68	8.74	8.75
2 Las Adjuntas	W	15.15	17.71	18.85	19.66	20.42	20.82	21.40	21.56
3 Tamuín (25)	W	22.51	24.09	24.62	24.92	25.14	25.23	25.33	25.35
3' Tamuín (39)	W	21.43	23.61	24.53	25.15	25.70	25.98	26.36	26.46
4 El Pujal	W	9.21	11.89	13.43	14.74	16.25	17.24	19.17	19.87
5 Tansabaca	G	179.90	184.53	187.60	190.54	194.34	197.19	203.78	206.62
6 Santa Rosa	G	4.06	5.93	7.17	8.36	9.90	11.06	13.72	14.87
7 Ballesmi	LN3	6.12	6.90	7.32	7.67	8.08	8.35	8.92	9.14
8 El Olivo	W	20.90	22.98	23.63	23.98	24.22	24.31	24.41	24.42
9 El Higo	W	22.71	24.26	24.85	25.22	25.52	25.66	25.82	25.86
10 San Vicente T.	W	7.94	10.40	11.56	12.43	13.27	13.75	14.49	14.70
11 Tierra Blanca	W	140.40	141.45	142.07	142.62	143.25	143.67	144.52	144.84
12 Temamatla	W	117.09	118.94	120.04	121.02	122.19	122.99	124.63	125.25
13 Requetemu	G	5.17	7.27	8.66	9.99	11.71	13.00	15.99	17.27
14 Tempoal	W	15.31	20.36	22.72	24.44	26.09	27.00	28.40	28.79
15 Platón Sánchez	W	12.51	16.77	18.73	20.15	21.49	22.23	23.34	23.64
16 Terrerillos	G	90.98	92.85	94.02	95.28	96.82	97.98	100.65	101.80
17 Los Hules	G	3.86	5.09	5.90	6.68	7.69	8.45	10.20	10.95
18 Río Frío	G	6.60	9.35	11.18	12.93	15.19	16.89	20.81	22.50
19 San Gabriel	G	4.03	5.80	6.97	8.10	9.55	10.64	13.16	14.25
20 Magiscatzin	G	25.85	29.40	31.75	34.01	36.92	39.11	44.16	46.34
21 Tamesí	G	5.61	8.04	9.65	11.19	13.19	14.68	18.14	19.62
22 Tomates	G	3.09	3.81	4.29	4.74	5.34	5.78	6.81	7.25
23 Vichinchijol (17)	W	14.11	15.66	16.03	16.19	16.28	16.31	16.32	16.33
23' Vichinchijol (39)	W	13.48	15.69	16.51	17.02	17.43	17.62	17.85	17.89
23" Vichinchijol (I)	W	14.39	15.61	16.17	16.57	16.96	17.17	17.49	17.57
23''' Vichinchijol (II)	W	14.02	15.72	16.16	16.38	16.51	16.55	16.58	16.59
24 Tamicho (27)	W	11.34	12.13	12.28	12.34	12.37	12.38	12.38	12.38
24' Tamicho (39)	W	10.75	12.32	12.85	13.15	13.37	13.46	13.56	13.58
25 Tanchicuín (28)	W	9.89	10.94	11.23	11.37	11.45	11.49	11.51	11.52
25' Tanchicuín (39)	W	9.37	11.11	11.81	12.26	12.64	12.82	13.05	13.11
26 Tamós	G	1.67	2.42	2.92	3.40	4.02	4.48	5.55	6.01
27 Bombas # 1	G	0.95	1.32	1.56	1.80	2.10	2.33	2.86	3.09
27' Bombas # 1 (excedencias)		1.14	1.52	1.82	2.11	2.50	2.79	3.47	3.76
28 Boca Altamira	LN3	1.79	2.43	2.91	3.41	4.11	4.68	6.15	6.85
29 Bocatoma	F	1.43	1.81	2.09	2.39	2.82	3.17	4.11	4.58
30 Puente Chairel	G	1.27	1.88	2.29	2.68	3.19	3.57	4.45	4.83

Simbología:	FDP	Función de Distribución de Probabilidades
	W	Distribución Weibull
	G	Distribución Gumbel
	LN3	Distribución Log-Normal de 3 parámetros
	F	Distribución Fréchet

8. Registro de excedencias disponibles en las estaciones Pánuco y Bombas # 1

Número	Pánuco	Escala:	Bombas # 1	Escala:
	Valor umbral = 6.80 m Fecha de ocurrencia:		Valor umbral = 0.95 m Fecha de ocurrencia:	
1	28 de junio de 1966	7.66	20 de junio de 1966	0.96
2	21 de octubre de 1966	6.88	20 de octubre de 1966	0.96
3	2 de octubre de 1967	7.89	20 de octubre de 1967	1.67
4	15 de septiembre de 1969	8.16	15 de septiembre de 1969	1.21
5	15 de septiembre de 1970	6.94	15 de septiembre de 1970	0.94
6	30 de septiembre de 1974	8.40	30 de octubre de 1974	1.04
7	18 de septiembre de 1975	8.95	1975	1.32
8	17 de julio de 1976	8.16	1976	1.55
9	28 de septiembre de 1978	7.18	1979	0.96
10	20 de septiembre de 1984	8.16	1980	0.98
11	22 de septiembre de 1985	8.13	1984	1.44
12	8 de septiembre de 1988	7.01	1987	0.96
13	2 de agosto de 1990	7.09	16 de julio de 1991	1.46
14	7 de julio de 1991	7.54	octubre de 1991	1.24
15	14 de octubre de 1991	7.88	septiembre de 1993	1.87
16	26 de septiembre de 1993	8.70		

9. Periodos de retorno estimados para las escalas críticas y los niveles máximos observados en 21 localidades de la cuenca baja del río Pánuco

Número	Localidad:	Escala crítica	Periodo de retorno	Nivel máximo observado	año	Periodo de retorno
		(m)				
1	Pánuco (39)	7.30	3.1	9.12	1955	46.3
2	Las Adjuntas	16.50	3.0	22.08	1955	44.3
3	Tamuín (39)	23.85	5.8	24.81	1993	13.2
4	El Pujal	13.50	10.4	16.14	1955	46.6
5	Tansabaca	186.78	8.3	192.40	1993	31.3
6	Santa Rosa	5.50	4.0	7.97	1993	15.9
7	Ballesmi	6.00	1.8	8.80	1955	350.0
8	El Olivo	22.50	3.5	24.44	1993	14.6
9	El Higo	23.00	2.2	25.34	1993	26.9
10	San Vicente T.	11.08	7.3	12.36	1990	18.8
11	Tierra Blanca	142.30	13.2	143.00	1993	34.2
12	Temamatla	118.80	4.6	121.90	1990	39.4
13	Requetemu	7.35	5.2	10.48	1993	25.9
14	Tempoal	17.00	2.5	24.52	1955	20.8
15	Platón Sánchez	15.00	3.1	19.56	1990	14.6
16	Terrerillos	92.15	3.5	96.62	1990	44.3
17	Los Hules	5.08	5.0	8.00	1990	66.3
18	Río Frío	11.10	9.7	14.89	1976	44.3
19	San Gabriel	4.90	3.0	8.60	1955	27.4
20	Magiscatzín	28.00	3.4	35.55	1976	32.4
21	Tamesí	7.00	3.3	12.24	1976	32.2

tales niveles máximos asociados a los periodos de retorno indicados deben ser tomados en cuenta al adoptar los niveles de diseño.

Por otra parte, es probable que la contribución más importante de los análisis por subperiodos radique en haber brindado una mayor confiabilidad a los resultados obtenidos a través del procesamiento probabilístico de los registros completos, ya que muchos de ellos presentan omisiones y por lo tanto, sus resultados no podrían considerarse suficientemente confiables.

Análisis probabilístico como excedencias

Justificación y planteamiento

Tomando en cuenta que los registros de las estaciones Pánuco y Bombas # 1, definirán los niveles de diseño o revisión de la infraestructura de protección de las ciudades de Pánuco y Tampico, se consideró conveniente realizar en estas estaciones hidrométricas un análisis probabilístico de excedencias. El cuadro 8 muestra los registros de este tipo que se lograron integrar. El análisis probabilístico de las excedencias o magnitudes superiores a un valor umbral se llevó a cabo por medio del modelo Shane y Lynn (1964), expuesto y aplicado por Campos (1993).

Resultados y su confiabilidad

El análisis de las excedencias en Pánuco condujo al mejor ajuste cuando se ubicó el valor umbral en 7.75 m, obteniéndose 0.643 excedencias por año y un coeficiente de correlación lineal (R_{xy}) de 0.978 y los niveles máximos que se han concentrado en el cuadro 7. Para los datos de excedencias en Bombas # 1 el mejor ajuste se logró con un valor umbral de 1.00 m, encontrándose 0.692 exc/año y un $R_{xy} = 0.977$; los niveles máximos asociados a los periodos de retorno se aprecian en el cuadro 7. Ambos análisis no pueden ser considerados suficientemente confiables, ya que los valores del R_{xy} evaluado son bajos con respecto a los que deben obtenerse con este modelo, comúnmente superiores a 0.990 (Shane y Lynn, 1964).

Estimación de los periodos de retorno de las escalas críticas

Del informe sobre las crecientes máximas del año 1993 ocurridas en el río Pánuco (GRN, 1994; GESLP, 1994) se obtuvieron las escalas críticas o niveles de inicio de los problemas de inundaciones asociados a los desbordamientos del río Pánuco y sus colectores, relación que se tiene en el cuadro 9, en el cual se tie-

nen los periodos de retorno estimados al realizar gráficas en papel semilogarítmico para cada estación hidrométrica, con los periodos de retorno (dos, cinco, diez, veinte, cincuenta y cien años) en las abscisas en la escala logarítmica y sus correspondientes niveles en las ordenadas; en general estas gráficas resultaron curvas cóncavas hacia abajo, o bien casi lineales, únicamente en la estación San Gabriel del río Guayalejo se obtuvo una gráfica que presenta concavidad hacia arriba. Estas estimaciones gráficas fueron comprobadas por medio de interpolaciones numéricas con polinomios de Newton (Chapra y Canale, 1988).

Del análisis global de los valores del cuadro 9 se puede concluir que los periodos de retorno más grandes ocurren en las estaciones o sitios ubicados aguas arriba, y que la frecuencia media de las inundaciones en la zona baja del río Pánuco es del orden de sólo tres años (estaciones Pánuco, Las adjuntas, El Olivo, Temporal, Platón Sánchez, Terrerillos, San Gabriel, Magiscatzín y Tamesí).

Estimación de los periodos de retorno correspondientes a los niveles máximos observados

De los cuadros 1, 2, 3 se obtienen los niveles máximos observados, para cada uno de los cuales se estima su correspondiente periodo de retorno con el procedimiento gráfico ya descrito, los valores obtenidos se han concentrado en el cuadro 9. Los periodos de retorno estimados para los niveles máximos observados fluctúan entre 14 años en Tamuín, Santa Rosa, El Olivo y Platón Sánchez, a 350 años en Ballesmi; el resto varía entre veinte y 45 años, en términos generales. En realidad existe bastante correspondencia entre los periodos de retorno estimados y las amplitudes de cada registro mostradas en el cuadro 4.

Estimación de los periodos de retorno de las crecientes más severas ocurridas en el río Pánuco

Las crecientes o avenidas máximas más severas en la cuenca del río Pánuco, definidas por los daños que han causado, corresponden a los años de 1955, 1967, 1969, 1974 a 1976, 1984, 1990, 1991 y 1993. Lo anterior se ha comprobado al destacar en los cuadros 1, 2 y 3 las magnitudes de niveles máximos superiores a la suma de la media aritmética más la desviación estándar, en cada estación hidrométrica analizada. En la cuenca del río Guayalejo-Tamesí las crecientes más severas identificadas con el procedimiento descrito corresponden a los años 1955, 1966, 1970, 1973, 1976, 1977, 1983, 1987, 1992 y 1993.

Al tomar de los cuadros 1, 2 y 3 los niveles máximos anuales correspondientes a los años citados, se les puede estimar un periodo de retorno con base en las gráficas descritas de periodo de retorno contra nivel. Los resultados de estas estimaciones se han concentrado en el cuadro 10 y a partir de tales valores se han formulado las siguientes observaciones y adoptado los periodos de retorno medios del último renglón para las crecientes bajo análisis:

- De acuerdo a los datos disponibles, al parecer las grandes crecientes de los ríos Pánuco y Tamesí no son completamente simultáneas, con excepción de la creciente de 1955
- Las crecientes ocurridas en los años 1976 y 1983, en primer lugar y 1967 y 1987 en segundo término no tuvieron un efecto generalizado, por ello sus correspondientes periodos de retorno estimados en las estaciones analizadas no son semejantes
- Las crecientes más severas en el río Pánuco corresponden a los años 1955 y 1993 y en el río Tamesí son las de los años 1955 y 1976

Conclusiones

Los resultados del cuadro 5 muestran la bondad de ajuste de las distribuciones GVE y Gumbel, para el procesamiento probabilístico de niveles máximos anuales, cuantificada esta capacidad por medio del EEA. Se recomienda efectuar la selección de la más

conveniente, a través de la aplicación de las pruebas de Van Montfort y Otten & Van Montfort, cuya parte operativa se ha presentado con detalle.

Los resultados del cuadro 9 destacan el reducido valor que tiene el periodo de retorno, del orden de tres años, para el inicio de los problemas de inundación en la zona de la planicie del río Pánuco, definidos éstos a través de las denominadas escalas críticas. También en el cuadro 9 se muestran los periodos de retorno estimados para los niveles máximos observados, los cuales fluctúan en general de 13 a 45 años.

Los bajos periodos de retorno estimados para las crecientes más importantes que han ocurrido en la parte baja del río Pánuco, según resultados del cuadro 10, manifiestan la necesidad de revisar y rediseñar la infraestructura de protección contra crecientes, y por otra parte, establecen la necesidad de elaborar estrategias de manejo de tales crecientes, dada su alta periodicidad la cual varía de cinco a 45 años.

Los niveles máximos anuales correspondientes a los periodos de retorno indicados en el cuadro 7, permitirán revisar la seguridad de las obras de infraestructura de protección contra crecientes o bien definirán los niveles que deberán tener las nuevas obras para brindar la mayor protección posible.

Los resultados del cuadro 10, sugieren realizar un estudio sobre la simultaneidad de las crecientes de los ríos Tamesí y Pánuco, para intentar evaluar con más precisión este riesgo, que hasta ahora no se ha presentado de una forma contundente.

10. Niveles máximos observados y periodos de retorno estimados (T_r , en años) de las crecientes más severas

Años de ocurrencia de las crecientes más severas en la cuenca del río Pánuco										
Estación	1955	1967	1969	1974	1975	1976	1984	1990	1991	1993
Pánuco (39)	9.12(46.3)	7.89(5.0)	8.16(6.7)	8.40(9.3)	9.04(34.9) ¹	8.28(7.8)	8.18(6.9)	7.09(2.9)	7.90(5.1)	8.76(17.3)
Las Adjuntas	22.08(44.3)	16.88(3.5)	17.24(4.0)	18.02(5.9)	18.27(6.8)	17.57(4.7)	17.90(5.5)	17.84(5.3)	18.02(5.9)	19.27(13.9)
Tamuín (39)	25.18(20.8)	24.06(6.7)	24.29(8.1)	24.54(10.1)	24.23(7.7)	24.71(11.9)	23.16(3.9)	23.16(3.9)	24.17(7.3)	24.81(13.2)
El Pujal	16.14(46.6)	12.10(5.5)	12.63(6.9)	13.74(11.7)	12.42(6.3)	14.14(14.4)	11.08(3.7)	12.88(7.7)	SD	14.70(19.6)
Tansabaca	SD	185.90(6.8)	186.54(7.8)	187.90(10.7)	186.58(7.9)	188.70(12.9)	182.92(3.6)	186.00(6.9)	184.04(4.5)	192.40(31.3)
El Olivo	SD	21.46(3.2)	22.20(3.9)	23.54(8.7)	23.54(8.7)	20.98(2.2)	23.12(5.5)	23.28(6.4)	23.25(6.2)	24.44(14.6)
El Higo	16.722	22.44(<2)	23.03(2.5)	24.50(6.3)	24.35(5.4)	21.38(<2)	23.92(3.9)	24.40(5.7)	24.30(5.2)	25.34(26.9)
San Vicente T.	SD	SD	SD	12.00(13.8)	11.27(8.2)	7.30(<2)	10.06(4.2)	12.36(18.8)	9.95(4.0)	9.56(3.4)
Tempoal	24.52(20.8)	17.18(2.7)	17.48(2.8)	22.52(9.3)	22.02(7.9)	14.10(<2)	22.30(8.7)	23.27(12.2)	21.53(6.8)	23.26(12.1)
T_r Medio	45	4.4	5.3	9.5	7.4	---	5.1	7.8	5.6	16.9

Años de ocurrencia de las crecientes más severas en la cuenca del río Guayalejo-Tamesí

Estación	1955	1967	1969	1974	1975	1976	1984	1990	1991	1993
Río Frío	SD	12.08(14.2)	10.62(8.1)	8.06(3.2)	14.89(44.3)	11.30(10.5)	6.28(<2)	8.70(4.0)	10.20(6.9)	11.92(13.4)
San Gabriel	8.60(27.4)	8.00(18.8)	5.91(5.3)	3.58(<2)	7.30(12.2)	7.45(13.4)	6.40(7.1)	3.67(<2)	3.58(<2)	8.20(21.3)
Magiscatzin	34.34(22.2)	31.36(8.9)	31.48(9.2)	30.54(7.0)	35.55(32.4)	31.34(8.8)	25.14(<2)	27.64(3.0)	29.87(5.7)	32.64(13.1)
Tamesí	SD	SD	SD	10.03(11.8)	12.24(32.2)	8.15(5.2)	5.41(<2)	6.31(2.5)	7.32(3.7)	9.45(9.2)
T_r Medio	25	14	7.5	6	30	9.5	---	2.5	4.5	14

1 no se incluye

2 dato o valor no confiable

SD sin dato

Las diferencias en cotas de diseño encontradas en las estaciones hidrométricas de la zona de Tampico-Madero (cuadro 7), destacan la necesidad de realizar un modelo físico que reproduzca los efectos locales de remansos, caídas y marea de viento, para ratificar o rectificar tales resultados.

Recibido: febrero, 1995

Aprobado: abril, 1995

Agradecimientos

A las gerencias estatales de la CNA en Tamaulipas, San Luis Potosí y Veracruz por haber proporcionado la información de los cuadros 1, 2, 3 y 8. A la Gerencia Regional Noreste de la CNA en San Luis Potosí, se le reconoce el interés en este estudio y el haber proporcionado el documento sobre el huracán Gert.

Referencias

- Benson, M.A. 1962. Plotting positions and economics of engineering planning. *J. Hydraulics Division, ASCE* 88(HY6): 57-71.
- Bobée, B. 1975. The Log Pearson type 3 distribution and its application in hydrology. *Water Resources Research*, 11(5): 681-689.
- Campos A., D.F. 1988. Función de distribución de probabilidades Gamma Mixta: Soluciones y aplicaciones. *Memorias del 10º Congreso Nacional de Hidráulica, Morelia, Michoacán, México*. Tomo II (subtema 6): 318-322.
- Campos A., D.F. 1991. Programa en Basic para el ajuste de la función de distribución de probabilidades GVE. *Memorias del II Congreso Nacional de Informática para la Ingeniería*. Diskette 1, AMII. Puebla, Puebla, México.
- Campos A., D.F. 1993. *Análisis probabilístico de lluvias máximas diarias tratadas como excedencias*. Centro de Investigación y Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UASLP. San Luis Potosí, San Luis Potosí, México. 34 p.
- Chapra, S.C. y R.P. Canale. 1988. *Métodos matemáticos para ingenieros*. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana de México: (Tópico 11.1: Polinómios de interpolación con diferencias divididas): p. 350-363.
- Chow, V.T. 1964. Statistical and probability analysis of hydrologic data. En: Ven Te Chow. Editor-in-chief. *Handbook of applied hydrology*. New York, U.S.A.: McGraw-Hill Book Co: (Section 8-I, Part I: Frequency Analysis). p. 8-1 a 8-42.
- Clarke, R.T. 1973. The estimation of floods with given return period. En: *Mathematical models in hydrology*. Irrigation and Drainage Paper 19. Rome, Italy: FAO. (Chapter 5).
- Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR). 1994. *Períodos de retorno para la determinación del gasto máxima en diseño en diversos tipos de obras hidráulicas*. Informe interno. México D.F., México: Subdirección General de Administración del Agua, C.N.A./S.A.R.H. 5 p.
- Gerencia Regional Noreste (GRN). 1994. *Efectos del Huracán "Gert" en la cuenca baja del río Pánuco*. Informe interno. San Luis Potosí, San Luis Potosí, México: C.N.A./S.A.R.H. 60 p.
- Gerencia Estatal en San Luis Potosí (GESLP). 1994. *El Huracán "Gert": Sus efectos en el territorio potosino*. Informe interno. San Luis Potosí, San Luis Potosí, México: C.N.A./S.A.R.H. 8 p.
- Greis, N.P. y E.F. Wood. 1981. Regional Flood Frequency Estimation and Network Design. *Water Resources Research* 17(4): 1167-1177.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1984. *Cantidad de lluvia más frecuente (moda) en la República Mexicana*. México D.F., México.
- Jenkinson, A.F. 1969. Statistics of Extremes. En: *Estimation of Maximum Floods*. Technical Note No. 98, WMO-No. 233. TP: 126. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization. (Chapter 5).
- Kite, G.W. 1977. Type I extremal distribution y Comparison of Frequency Distributions. En: *Frequency and Risk Analysis in Hydrology*. Fort Collins, CO., U.S.A.: Water Resources Publication. (Chapter 8 y Chapter 12).
- Kottegoda, N.T. 1980. Pearson type III function applied to extreme values. En: *Stochastic Water Resources Technology*. London, England: MacMillan Press, Ltd. (Theme 6.6).
- Natural Environment Research Council (NERC). 1975. Statistics of Flood Hydrology. En: *Flood Studies Report*. London, England. (Vol. I: Hydrological Studies, Chapter 1).
- Otten, A. y M.A.J. Van Montfort. 1978. The Power of Two Test on the Type of Distributions of Extremes. *J. Hydrology* 37:195-199.
- Raynal V., J.A. 1984a. La distribución general de valores extremos en hidrología: 2. Estado actual y aplicaciones. *Memorias del VIII Congreso Nacional de Hidráulica*, Toluca, Mexico, Mexico: Vol. I (Subtema 2): B.9-B.19.
- Raynal V., J.A. 1984b. Aplicación del método de momentos de probabilidad pesada a la estimación de los parámetros de la distribución general de valores extremos. *XI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Buenos Aires, Argentina.
- Shane, R.M. and W.R. Lynn. 1964. Mathematical Model for Flood Risk Evaluation. *J. Hydraulics Division, ASCE* 90 (HY6):1-20.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). 1970. *Boletín Hidrológico No. 32. Tomo I: Bajo Pánuco excluyendo el río Guayalejo*. México D.F., México: Jefatura de Irrigación y Control de Ríos. S.R.H.
- Sevruk, B. y H. Geiger. 1981. *Selection of Distribution Types for Extremes of Precipitation*. Operational Hydrology Report No. 15. WMO-No. 560. Geneva, Switzerland. World Meteorological Organization.
- Thom, H.C.S. 1971. General Statistical Methods. En: *Some Methods of Climatological Analysis*. Technical Note No. 81, WMO-No. 199, TP: 103. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. (Chapter 3): p. 17-53.
- United States Water Resources Council (WRC). 1977. *Guidelines for Determining Flood Flow Frequency*. Bulletin # 17 A. Revised edition. Washington, D.C., U.S.A.: WRC Hydrology Committee.

Van Montfort, M.A.J. 1970. On testing that the distribution of extremes is of Type I when Type II is the alternative. *J. Hydrology* 11:421-427.

Wallis, J.R. y E.F. Wood. 1985. Relative accuracy of Log-Pearson III procedures. *J. Hydraulic Engineering*, 111(7): 1043-1056.

Abstract

Campos-Aranda, D.F., "Hydrological Characterization of Floods in the Lower Panuco River Basin with Respect to Yearly Maximum Levels". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. XI. Num. 2, pages 15-31, May-August, 1996.

This paper presents several aspects of flood studies. The first is a contrast analysis of 5 probability distribution functions to determine the most appropriate for registers of yearly maximum levels; second, a description is given of the estimates of return periods for the critical scale (minimum flood level) for each town within the range of the corresponding hydrometric station; third, the return periods for the maximum observed levels in the 30 registers used in this study and fourth, an estimate is made of the periodicity of the most severe floods in the lower Panuco River basin. The General Extreme Values distribution (GEV) was accepted as appropriate to examine historical registers. The greatest periodicity associated with the levels corresponding to the critical scales lies between 2 to 13 years; for the most severe floods, the interval lies between 5 to 45 years. The magnitude of the maximum levels associated with several return periods, included as additional results of the first analysis, allows us to design or check the protection infrastructure against floods.

Key words: Pánuco river, Floods, probabilistic analysis, GEV (in Spanish) distribution, design return periods.