

ESTIMACIÓN DE LA SEVERIDAD DE SEQUÍAS AMBIENTALES MEDIANTE REGISTROS DE LLUVIA MENSUAL

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

Resumen

Se definen las sequías y se citan sus indicadores más comunes. Se clasifican las sequías en ambientales y de abastecimiento de agua. Para las primeras se propone un sistema simple para definir su severidad y duración. Se sugiere emplear el registro de lluvia mensual, completando datos mensuales faltantes con su moda, para identificar años con sequía. El procedimiento consiste en obtener las medianas mensuales y después las diferencias entre cada lluvia y su mediana. La suma de las diferencias negativas en cada año define el déficit anual de lluvia, el cual es un indicador numérico del comportamiento anómalo de ésta. El análisis probabilístico de los déficits anuales a través de varios modelos, seleccionando el de menor error estándar de ajuste, permite encontrar los límites correspondientes a los periodos de retorno de 5, 20 y 50 años, con los cuales se definen los años con sequía moderada, fuerte y severa. El procedimiento sugerido se aplicó al registro de 123 años, disponible en el observatorio meteorológico de San Luis Potosí, México, encontrando que sus resultados coinciden con los de otros estudios previos.

Palabras clave: sequías, lluvia mensual, moda, medianas, modelos probabilísticos.

Introducción

Una definición general de una sequía establece que es un decremento de la disponibilidad de agua en un determinado periodo y sobre un área específica. Las consecuencias de una sequía son fácilmente reconocidas y sentidas por la sociedad; en cambio, la evaluación de su severidad es un problema complejo, principalmente por la variedad de indicadores que pueden ser utilizados. Por ejemplo, existen los indicadores ambientales (meteorológicos e hidrológicos), que miden los efectos directos en el ciclo hidrológico, y los indicadores de recursos hidráulicos, que estiman la severidad en términos del impacto de la sequía en el uso del agua (abastecimiento, riego, gasto ecológico, usos recreativos, etcétera). En términos generales, los indicadores ambientales miden la severidad "natural" de una sequía, mientras

que los indicadores de recursos hidráulicos implican la interferencia del elemento humano y pueden reflejar una mala planeación y/o manejo deficiente de las obras hidráulicas involucradas (Mawdsley *et al.*, 1994).

Entre los indicadores ambientales se tienen la lluvia (P), la temperatura, la evapotranspiración (ETP), la lluvia efectiva ($P - ETP$), el déficit de humedad del suelo, los cambios en el agua subterránea (recarga, nivel y almacenamiento), el escurrimiento en los ríos y la evolución de los embalses (entradas, almacenamiento, extracciones). Los principales indicadores de recursos hidráulicos son las restricciones a los usos agrícolas, las reducciones en el abastecimiento de agua potable y las suspensiones a los usos comerciales (lavado de autos) y recreativos (riego de campos de golf, jardines, etcétera). El análisis de cada uno de los indicadores citados, en cuanto a su relación

estrecha con las sequías y su disponibilidad de datos, define los cuatro siguientes como los indicadores más convenientes: la lluvia, el almacenamiento en los embalses, el nivel de las aguas subterráneas y el escurrimiento de los ríos (Mawdsley *et al.*, 1994).

En este trabajo se propone utilizar el registro de lluvia mensual para identificar los años de sequía mediante el análisis probabilístico de un indicador anual de su déficit. Se probó establecer este indicador con respecto a la media aritmética y la mediana mensuales; se propone el basado en la mediana. Se identifica cada año como libre de sequía o con sequías moderada, fuerte y severa. El procedimiento sugerido se aplicó al registro de 123 años del observatorio meteorológico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México; sus resultados coinciden con los de otros estudios de sequías.

Desarrollo

Tipo y clasificación de las sequías

En general, conviene clasificar a las sequías por tipo, intensidad y duración. En relación con el tipo, se definen las sequías ambientales y las de abastecimiento de agua. Las primeras detectan las deficiencias de la lluvia, cuyos efectos se aprecian en el estado del tiempo atmosférico, en la agricultura de temporal y en el bajo escurrimiento en los ríos. En las sequías de abastecimiento de agua se intentan medir los efectos en los usuarios del agua. Respecto a la intensidad o severidad,

la clasificación más simple de las sequías es (1) moderadas, (2) fuertes y (3) severas, asignando a cada una un código de color (amarillo, anaranjado y rojo, respectivamente), cuando se busca representar su cobertura espacial. Finalmente, respecto a su duración, la clasificación más sencilla es de una estación de lluvias o año, y de varios años.

Severidad de sequías ambientales

En el procedimiento propuesto para detectar estas sequías se hace la siguiente simplificación básica: se trabaja por años, utilizando el registro de lluvia mensual P_j^i , con j variando de 1 a 12 e i de 1 al número de años. Entonces, habiendo completado el registro, se obtienen sus medianas mensuales (M_j) y se hace en cada mes del registro la diferencia $P - M_j$; sumando únicamente los valores negativos, se obtiene el déficit anual de la lluvia (DA_i).

Con base en el análisis probabilístico de los DA_i se obtienen los límites para definir la severidad de las sequías, pues se acepta el criterio de Mawdsley *et al.* (1994), expuesto en el cuadro 1. Lógicamente, el límite con periodo de retorno de cinco años define hacia abajo los años sin sequía.

Tomando en cuenta que en este nivel bajo de periodos de retorno los modelos probabilísticos conducen a valores muy semejantes, se consideró suficiente realizar tal procesamiento con base únicamente en la transformación MIMEMA y el ajuste de las distribuciones Log-Pearson tipo III y General de Valores Extremos, adoptando los resultados del modelo con el menor error estándar de ajuste (Campos-Aranda, 2006).

Cuadro 1. Criterio de severidad de las sequías ambientales según Mawdsley *et al.* (1994).

Clasificación	Periodo de retorno	Probabilidad de no excedencia $P(X < x)$
1. Moderada (amarillo)	5 a 20 años	0.80 a 0.95
2. Fuerte (anaranjado)	20 a 50 años	0.95 a 0.98
3. Severa (rojo)	> 50 años	> 0.98

Aplicación en el observatorio meteorológico de San Luis Potosí

El registro disponible de lluvia mensual —tomado de Moreno-Castro *et al.* (2004)— abarca de julio de 1877 a diciembre de 2000, estando incompleto el año 1913 y faltantes de 1914 a 1921. Por lo anterior, en esta referencia se tiene un registro completo de 114 años. Además, en la Facultad de Ingeniería de la UASLP se obtuvo la información relativa al periodo de enero de 2001 a diciembre de 2009, con dos años incompletos, 2007 y 2008, ambos en los meses de mayo y julio. Estos datos faltantes se supusieron iguales a la moda de tales meses, por lo cual primero se procesó probabilísticamente el registro de 123 o 121 años con base en la distribución Gamma Mixta (Campos-Aranda, 2005), aplicada a cada mes, para estimar la moda y la mediana poblacionales. Los resultados se tienen en el cuadro 2. El registro de lluvia mensual de 2001 a 2009 completado se muestra en el cuadro 3.

Para verificar la consistencia del procedimiento sugerido se utilizaron las medias aritméticas y las medianas del cuadro 2 para obtener los déficits anuales de lluvia (DA_i). En el cuadro 4 se muestran estos cálculos para el año 2005; en cambio en el cuadro 5 se presentan todos los valores de DA_i sin el signo negativo.

El análisis probabilístico de las dos series de 123 déficits anuales mostrados en el cuadro 5 a través de los modelos probabilísticos citados anteriormente condujo a los resultados mostrados en el cuadro 6, entonces los valores adoptados —por tener el menor error estándar de ajuste— para los periodos de retorno de 5, 20 y 50 años de los déficits con respecto de la media aritmética son 156.7, 196.1 y 215.8 mm, respectivamente. En cambio, para los déficits con respecto de la mediana, las magnitudes respectivas de los periodos de retorno citados son 96.4, 130.3 y 147.6 mm.

Los déficits anuales en cuanto a la media aritmética a través de los límites respectivos

Cuadro 2. Valores asociados con la tendencia central en el registro mensual de 123 o 121 años de 1878-2009 del observatorio meteorológico de San Luis Potosí, México.

Estadística	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Número de datos nulos	36	38	43	20	6	2	3	2	0	5	26	31	—
Media aritmética	10.2	7.7	7.0	14.7	32.4	66.3	52.3	49.5	63.2	28.3	12.4	10.0	354.0
Mediana poblacional	3.9	3.4	2.1	9.0	24.9	53.8	42.3	41.3	51.9	20.8	5.5	4.7	263.6
Moda	NE	NE	NE	NE	9.0	27.0	20.8	23.8	26.8	4.8	NE	NE	112.2
Precip. con $P(X > x) = 0.75$	0.0	0.0	0.0	1.9	11.5	29.0	22.3	23.3	28.9	9.2	0.2	0.0	126.3

NE: no existe.

Cuadro 3. Precipitación mensual en el periodo 2001 a 2009 en el observatorio meteorológico de San Luis Potosí, México.

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
2001	3.1	5.0	4.9	60.5	18.8	42.3	34.7	25.5	54.6	8.0	2.0	8.0	267.4
2002	29.7	25.4	0.0	22.4	10.9	59.2	0.0	58.3	59.5	0.0	24.5	0.0	289.9
2003	0.0	0.0	0.0	2.5	40.5	53.5	178.6	47.3	87.7	32.0	0.0	28.8	470.9
2004	0.0	11.1	0.0	2.5	64.7	146.4	88.7	41.8	90.6	28.4	0.0	6.7	480.9
2005	0.0	40.4	8.0	1.8	3.0	0.0	0.0	117.1	122.5	0.0	0.0	0.0	292.8
2006	24.0	0.0	5.8	18.6	36.0	7.2	18.0	54.1	265.6	32.0	37.7	11.8	510.8
2007	0.0	25.3	0.0	22.3	9.0	191.2	20.8	70.8	64.9	12.0	15.0	0.0	431.3
2008	0.8	0.0	0.0	9.4	9.0	19.1	20.8	128.9	59.6	12.5	0.2	0.0	260.3
2009	2.5	0.0	7.4	0.4	61.4	31.0	35.0	10.2	243.9	58.0	11.2	36.8	497.8

Cuadro 4. Cálculos del déficit anual de la lluvia (DA_i) con respecto a la media aritmética y la mediana mensuales en el año 2005 del observatorio meteorológico de San Luis Potosí, México.

Mes	P_{mensual} (mm)	P_{media} (mm)	Diferencia (mm)	P_{mediana} (mm)	Diferencia (mm)
Enero	0.0	10.2	-10.2	3.9	-3.9
Febrero	40.4	7.7	32.7	3.4	37.0
Marzo	8.0	7.0	1.0	2.1	5.9
Abril	1.8	14.7	-12.9	9.0	-7.2
Mayo	3.0	32.4	-29.4	24.9	-21.9
Junio	0.0	66.3	-66.3	53.8	-53.8
Julio	0.0	52.3	-52.3	42.3	-42.3
Agosto	117.1	49.5	67.6	41.3	75.8
Septiembre	122.5	63.2	59.3	51.9	70.6
Octubre	0.0	28.3	-28.3	20.8	-20.8
Noviembre	0.0	12.4	-12.4	5.5	-5.5
Diciembre	0.0	10.0	-10.0	4.7	-4.7
DA_i	292.8	354.0	-221.8	263.6	-160.1

Cuadro 5. Déficit anual en milímetros con respecto a la media aritmética y la mediana en el observatorio meteorológico de San Luis Potosí, México.

Núm.	Año	DA_i^*	DA_i^{**}	Núm.	Año	DA_i^*	DA_i^{**}	Núm.	Año	DA_i^*	DA_i^{**}	Núm.	Año	DA_i^*	DA_i^{**}
1	1878	153.6	91.0	32	1909	89.6	41.9	63	1949	167.4	89.5	94	1980	184.4	130.0
2	1879	91.5	45.0	33	1910	146.1	80.2	64	1950	150.6	91.9	95	1981	94.2	54.6
3	1880	149.1	88.7	34	1911	156.0	119.7	65	1951	121.2	60.4	96	1982	176.9	127.6
4	1881	109.2	72.9	35	1912	136.4	83.2	66	1952	101.1	38.7	97	1983	132.4	77.1
5	1882	132.6	91.1	36	1922	71.9	26.2	67	1953	99.9	43.0	98	1984	124.0	69.2
6	1883	145.9	96.4	37	1923	116.0	66.9	68	1954	145.1	77.9	99	1985	60.6	33.6
7	1884	171.1	99.5	38	1924	102.6	51.3	69	1955	118.1	65.6	100	1986	104.2	56.6
8	1885	72.5	36.1	39	1925	53.6	17.2	70	1956	131.1	66.2	101	1987	109.1	65.0
9	1886	118.8	63.2	40	1926	101.7	47.1	71	1957	132.4	71.7	102	1988	111.6	53.8
10	1887	37.4	15.4	41	1927	68.7	27.2	72	1958	40.8	17.0	103	1989	166.2	113.9
11	1888	70.2	41.2	42	1928	115.8	58.1	73	1959	51.5	14.9	104	1990	131.5	67.4
12	1889	116.0	69.7	43	1929	161.3	102.3	74	1960	170.5	93.7	105	1991	65.7	37.9
13	1890	100.1	56.6	44	1930	98.4	60.0	75	1961	87.7	37.1	106	1992	111.6	69.9
14	1891	166.9	112.1	45	1931	93.9	48.3	76	1962	158.1	91.3	107	1993	73.3	28.3
15	1892	134.4	81.8	46	1932	70.7	31.6	77	1963	117.9	60.6	108	1994	92.7	51.2
16	1893	67.1	29.0	47	1933	67.4	31.0	78	1964	113.0	63.3	109	1995	190.6	120.6
17	1894	173.9	106.7	48	1934	103.0	56.9	79	1965	73.2	45.7	110	1996	149.8	78.9
18	1895	147.5	89.3	49	1935	105.0	58.4	80	1966	128.9	73.4	111	1997	107.8	76.1
19	1896	218.7	148.4	50	1936	92.4	42.3	81	1967	70.2	43.0	112	1998	132.6	74.0
20	1897	95.3	41.7	51	1937	178.1	116.2	82	1968	53.4	15.8	113	1999	76.4	21.3
21	1898	97.3	47.7	52	1938	128.0	73.6	83	1969	188.5	114.1	114	2000	213.1	143.4
22	1899	216.7	138.8	53	1939	123.2	71.5	84	1970	192.5	118.9	115	2001	132.4	58.1
23	1900	176.3	114.2	54	1940	132.0	82.2	85	1971	132.9	72.7	116	2002	129.9	83.9
24	1901	161.5	96.3	55	1941	43.7	25.8	86	1972	102.9	55.0	117	2003	64.5	21.7
25	1902	209.8	131.2	56	1942	120.7	63.3	87	1973	98.1	44.7	118	2004	52.8	18.0
26	1903	100.3	52.1	57	1943	149.9	92.5	88	1974	155.3	97.2	119	2005	221.8	160.1
27	1904	47.2	13.9	58	1944	107.8	56.1	89	1975	138.0	72.1	120	2006	102.3	74.3
28	1905	124.5	80.3	59	1945	166.2	91.5	90	1976	58.7	30.1	121	2007	98.4	56.9
29	1906	106.8	58.3	60	1946	57.8	30.4	91	1977	71.2	35.0	122	2008	173.1	99.0
30	1907	199.2	118.3	61	1947	168.8	106.2	92	1978	102.6	59.5	123	2009	122.8	74.6
31	1908	126.3	74.2	62	1948	57.1	19.0	93	1979	158.8	98.7	-	-	-	-

* con respecto a la media aritmética.

** con respecto a la mediana.

Cuadro 6. Resultados de análisis probabilístico de las series de déficits anuales (DA_i).

Modelo probabilístico aplicado	EEA* (mm)	Periodo de retorno en años		
		5	20	50
DA_i con la media				
Transformación MIMEMA	4.0	156.4	195.6	215.6
Distribución Log-Pearson tipo III	3.6	156.6	198.2	219.8
Distribución General de Valores Extremos	3.5	156.7	196.1	215.8
DA_i con la mediana				
Transformación MIMEMA	3.3	96.1	131.3	149.2
Distribución Log-Pearson tipo III	2.0	96.4	130.3	147.6
Distribución General de Valores Extremos	2.2	95.4	127.8	145.1

* Error estándar de ajuste.

definen los siguientes veinte años con sequía moderada, tres años con sequía fuerte (f) y tres años con sequía severa (s): 1884, 1891, 1894, 1896 (s), 1899 (s), 1900, 1901, 1902 (f), 1907 (f), 1929, 1937, 1945, 1947, 1949, 1960, 1962, 1969, 1970, 1979, 1980, 1982, 1989, 1995, 2000 (f), 2005 (s) y 2008.

Los déficits anuales en relación con la mediana con base en los límites respectivos definen 19 años con sequía moderada, tres años con sequía fuerte (f) y dos años con sequía severa (s): 1883, 1884, 1891, 1894, 1896 (s), 1899 (f), 1900, 1902 (f), 1907, 1911, 1929, 1937, 1947, 1969, 1970, 1974, 1979, 1980, 1982, 1989, 1995, 2000 (f), 2005 (s) y 2008. En cuanto a las secuencias o periodos de sequías, se pueden definir los cuatro siguientes: de 1891 a 1896, de 1899 a 1902, de 1979 a 1982 y de 2005 a 2009. En la figura 1 se muestra la ocurrencia de los déficits anuales, así como los límites que definen a las sequías moderadas, fuertes y severas. Este gráfico de años-déficit permite una visualización más objetiva de los periodos de sequía.

Análisis de los resultados

Los déficits anuales con respecto de la media definen 26 años con sequía; en cambio, los obtenidos con la mediana, 24. Las diferencias son sutiles en relación con la severidad de cada año. Un contraste con otros resultados

previos en esta zona geográfica (Campos-Aranda, 1991) y en todo el país (Araiza-Rodríguez, 2004) establece una excelente concordancia tanto de años con sequía como en las secuencias de éstas. Se considera que la aplicación del procedimiento en todas las estaciones pluviométricas de una zona o región geográfica permitirá establecer las áreas de sequías moderada, fuerte y severa, las cuales serán identificadas con los colores amarillo, naranja y rojo, respectivamente. Se han llevado a cabo estudios con este enfoque con otros procedimientos de detección de sequías (Flores-Vázquez y Campos-Aranda, 1998; Araiza-Rodríguez, 2004).

Por otra parte, en la naturaleza del método propuesto queda implícito el trabajar por años cronológicos, pues los déficits anuales son procesados probabilísticamente como serie anual. Sin embargo, tales déficits también pueden proceder de un periodo más corto, por ejemplo, la temporada de lluvias, con lo cual se estaría dando más importancia sólo a las desviaciones estacionales de éstas.

Conclusiones

El procedimiento propuesto para detectar años de sequía ambiental y estimar su severidad es bastante simple y accesible, al requerir exclusivamente el registro de lluvia mensual completado.

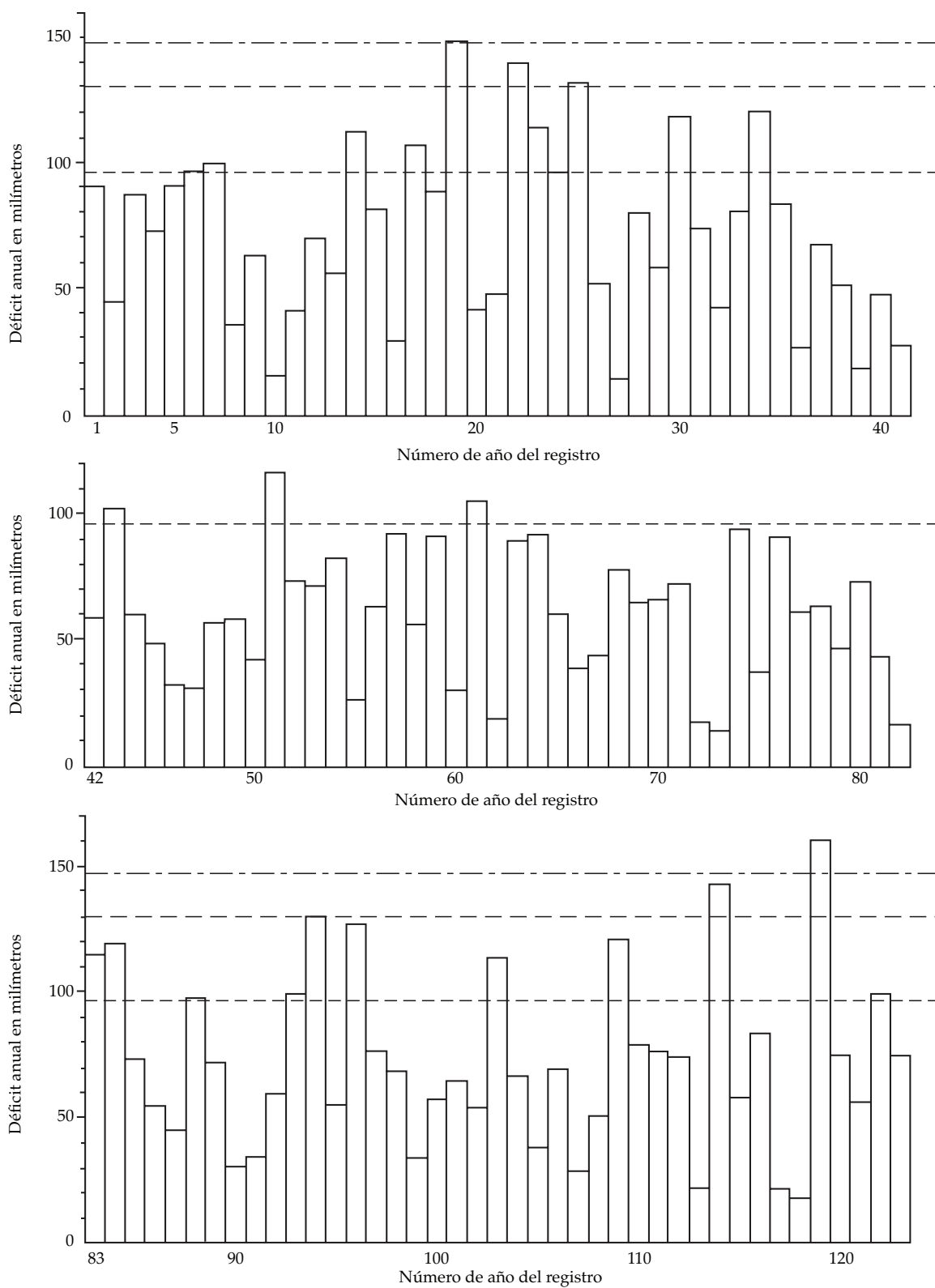


Figura 1. Déficits anuales con respecto a la mediana en el registro de lluvia del observatorio meteorológico de San Luis Potosí, México.

El déficit anual de lluvia (DA_i) permite detectar el comportamiento anómalo de ésta en relación con sus medianas mensuales y asignarle un valor numérico. El análisis probabilístico de tales déficits anuales para obtener sus valores asociados con periodos de retorno de 5, 20 y 50 años es una técnica estándar y confiable, con la cual se establece qué años tienen sequías moderadas, fuertes y severas (cuadro 1).

La aplicación de este procedimiento en todas las estaciones pluviométricas de una región o zona geográfica permitirá estimar la cobertura espacial de los años de sequía moderada, fuerte y severa, definiendo áreas de color amarillo, naranja y rojo para cada una, respectivamente.

Agradecimientos

Se agradece al árbitro anónimo, cuyas sugerencias permitieron volver más explícito el trabajo y definir mejor su alcance.

Se agradece al maestro en ciencias Abraham Cárdenas Tristán, coordinador de Ingeniería Geomática de la Facultad de Ingeniería de la UASLP, el haber proporcionado al autor la información pluviométrica mensual del periodo 2001-2009.

Recibido: 16/06/10

Aceptado: 28/09/11

Referencias

- ARAIZA-RODRÍGUEZ, J.A. *Detección de sequías en la República Mexicana analizando información pluviométrica con métodos estadísticos*. Tesis presentada para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Hidráulica. San Luis Potosí, México: Facultad de Ingeniería de la UASLP, 2004, 162 pp.
- CAMPOS-ARANDA, D.F. Estudio de Sequías en el Altiplano Potosino de la República Mexicana. *Acta Científica Potosina*. Vol. XIII, núm. 1, enero-junio de 1991, pp. 85-98.
- CAMPOS-ARANDA, D.F. *Agroclimatología Cuantitativa de Cultivos*. Anexo B: FDP Gamma Mixta. México, D.F.: Editorial Trillas, 2005, pp. 267-281.
- CAMPOS-ARANDA, D.F. *Análisis Probabilístico Univariado de Datos Hidrológicos*. Capítulo 3: Análisis probabilístico con datos transformados, páginas y capítulo 6: Análisis probabilístico con métodos paramétricos univariados. *Avances en Hidráulica* 13. México, D.F.: AMH-IMTA, 2006, pp. 51-65 y 89-115.
- FLORES-VÁQUEZ, I. y CAMPOS-ARANDA, D.F. Detección de períodos de sequía en la zona media del estado de San Luis Potosí, con base en registros de precipitación mensual. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XIII, núm. 2, mayo-agosto de 1998, pp. 45-56.
- MAWDSLEY, J., PETTS, G., and WALKER, S. *Assessment of Drought Severity*. Occasional Paper No. 3. London: British Hydrological Society, 1994, 41 pp.
- MORENO-CASTRO, D., CAMPOS-ARANDA, D.F. y CISNEROS-ALMAZÁN, R. *Estadística Climatológica del Observatorio Meteorológico de San Luis Potosí (1877-2000)*. San Luis Potosí, México: Facultad de Ingeniería de la UASLP, 2004, 79 pp.

Abstract

CAMPOS-ARANDA, D.F. Estimation of severity of environmental droughts through monthly rainfall records. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. III, No. 1, January-March, 2012, pp. 123-130.

This work defines droughts and cites their more common indicators, as well as presents a classification for environmental droughts and water supply droughts. For environmental droughts, a simple system is proposed to define their severity and duration. To identify drought years, the use of monthly rainfall records is suggested, completing missing monthly data with their mode. The procedure is aimed at obtaining the monthly medians and then the differences between each rainfall and its median. The sum of the negative differences for each year defines the annual rainfall deficit, which is a numerical indicator of its anomalous behavior. The probabilistic analysis of annual deficits using several models—selecting the one with the minimum standard error of fitting—allows for finding the limits associated with return periods of 5, 20 and 50 years, which define the years with moderate, strong and severe droughts. The suggested procedure was applied to 123 years of records available from the meteorological observatory in San Luis Potosi. The results of this study agree with the conclusions of previous studies.

Keywords: droughts, monthly rainfall, mode, medians, probabilistic models.

Dirección del autor

Dr. Daniel Francisco Campos-Aranda

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