

Detección de periodos de sequía en la zona media del estado de San Luis Potosí, con base en registros de precipitación mensual

Ignacio Flores

Unidad Zona Media de la UASLP

Daniel Francisco Campos Aranda

Facultad de Ingeniería de la UASLP

Se comenta el origen de las sequías y se cita una definición práctica de éstas. A continuación se define la Zona Media del estado de San Luis Potosí, incluyendo los municipios que abarca y se describe la información pluviométrica disponible en esta región, indicando cómo fueron estimados los diversos valores mensuales y anuales faltantes. En seguida se describe el análisis de homogeneidad realizado con base en la precipitación anual y aplicando 12 pruebas estadísticas. Posteriormente se describen muy brevemente los métodos de detección de periodos de sequías de Foley y Gibbs y Maher; se incluye en este inciso el análisis probabilístico de secuencias de precipitación mensual que comienzan en cada mes del año. Por último, se describen en forma sinóptica los resultados y se formulan conclusiones relativas al estudio.

Palabras clave: sequías, homogeneidad, decil, secuencias de precipitación mensual.

Introducción

La sequía es una manifestación regional de la fluctuación climática general asociada con anomalías o aberraciones a gran escala de la circulación atmosférica. Las causas de tales variaciones no han sido identificadas con certeza, de manera que sólo se tienen interesantes hipótesis, por ejemplo la del cambio climático, la de las manchas solares y la fluctuación de la radiación solar, la del impacto de los océanos, etc. (WMO, 1975).

Intentar definir las sequías es particularmente difícil, debido a los diferentes enfoques desde los cuales pueden ser estudiadas, estableciéndose las sequías meteorológicas o climatológicas, las hidrológicas y las agrológicas. Pero además, cada usuario del agua (precipitación, escurrimiento y/o agua almacenada), tiene su propia idea o concepción de sequía, y cada una de ellas cambia con las condiciones operativas del usuario (Dracup *et al.*, 1980).

Por ejemplo, el ingeniero interpreta las sequías según el comportamiento de la precipitación o el escurrimiento, o de acuerdo a la disponibilidad de agua alma-

cenada; en cambio el economista relaciona las sequías con la actividad humana afectada y el agricultor las define en función de las necesidades de agua de los cultivos, de manera que una sequía para el jitomate puede no serlo para el sorgo, pero además su concepto de sequía cambia con la época fenológica y la práctica de cultivo (Campos, 1996).

Bajo un punto de vista simple, *una sequía es la falta, escasez o déficit de agua que tiene significativa magnitud, duración e impacto en los humanos*. En esta definición la palabra relevante es *significativa*, la cual debe ser definida cuantitativamente con objeto de evitar subjetividad, por ejemplo a través de una convención o criterio claro y específico para el inicio y la terminación de la sequía (Yevjevich, 1988).

Con respecto a esto último, los procedimientos que se utilizaron en este estudio para la detección de los periodos de sequía, así como los que se sugieren para su continuación (caracterización de sequías), son totalmente específicos y están exentos de interpretación personal, además se aplican a los registros climatológicos que son más fácilmente obtenibles: los de precipitación mensual.

Por otra parte, respecto a los efectos generales de las sequías, éstos abarcan desde el desequilibrio ecológico hasta la migración humana, pasando por el deterioro o la reducción de las actividades agrícolas, ganaderas e industriales (Secretaría de Gobernación, 1994). La lucha contra las sequías requiere de medidas diferentes según los climas y la región afectada, desde las altamente pobladas e industriales, hasta las básicamente agrícolas o ganaderas (Campos, 1996).

Desarrollo

Zona de estudio y estaciones pluviométricas disponibles

Se ha considerado como *Zona Media* de San Luis Potosí, la región que abarcan los municipios de: Alaquines, Armadillo de los Infante, Cárdenas, Ciudad Fernández, Lagunillas, Rayón, Rioverde, San Cirio de Acosta, San Nicolás Tolentino y Santa Catarina, todos ellos dentro de la Región Hidrológica No. 26 (Pánuco); además se ha incluido parte de los municipios de Cerritos, Ciudad del Maíz, Villa de Juárez, Villa de Reyes y Villa de Zaragoza, los cuales en su mayor parte pertenecen a la Región Hidrológica No. 37 (El Salado) o altiplano potosino.

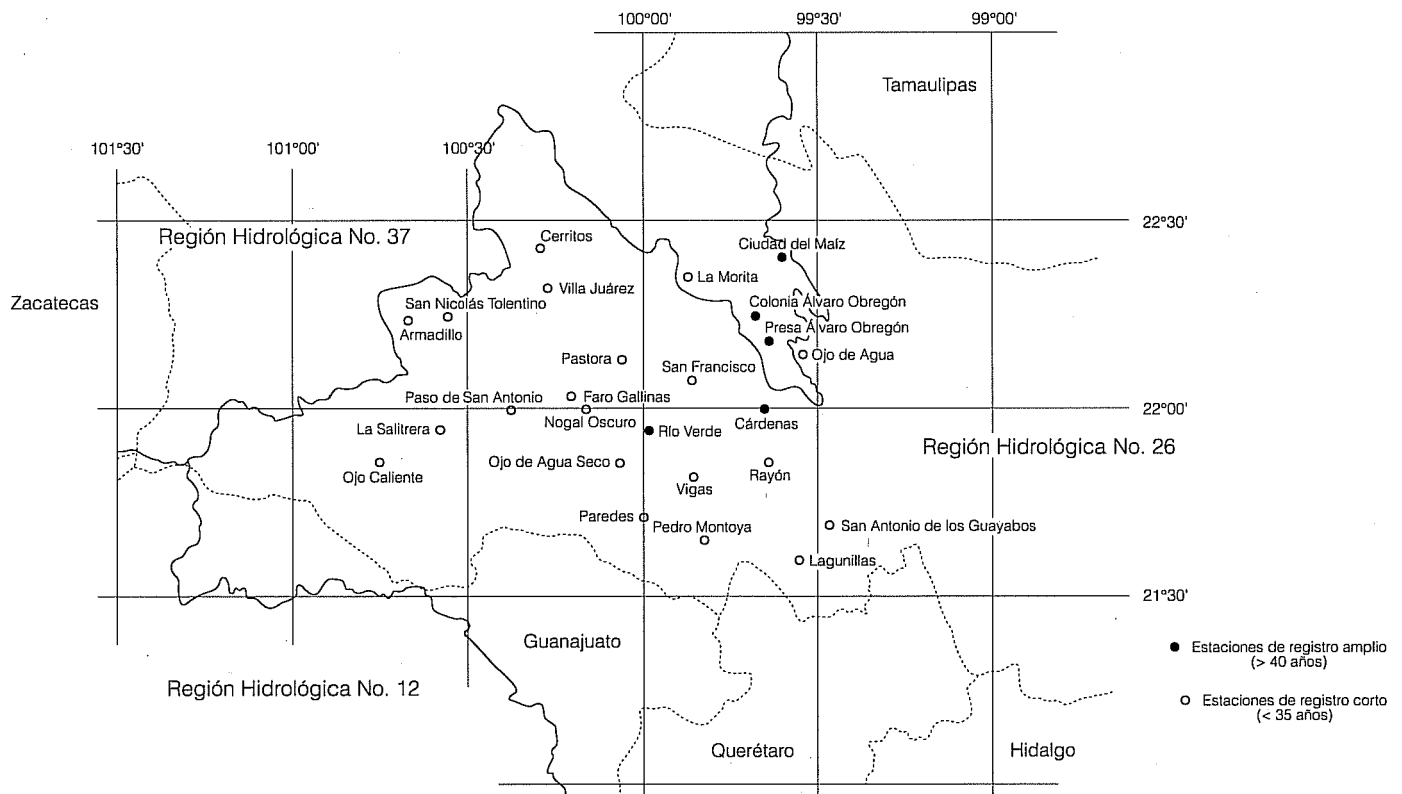
En la región descrita existe un total de 25 estaciones pluviométricas que son: Armadillo, Cárdenas, Cerritos, Ciudad del Maíz, Colonia Álvaro Obregón, Faro Gallinas, Lagunillas, La Morita, La Salitrera, Nogal Oscuro, Ojo Caliente, Ojo de Agua, Ojo de Agua Seco, Paredes, Paso de San Antonio, Pastora, Pedro Montoya, Presa Álvaro Obregón, Rayón, Rioverde, San Antonio de los Guayabos, San Francisco, San Nicolás Tolentino, Vigas y Villa Juárez. En la ilustración 1 se muestra la localización geográfica de los 25 pluviómetros citados y por consecuencia la extensión geográfica de la conocida como Zona Media de San Luis Potosí.

Recopilación de la información

De los Boletines Climatológicos (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1980a,b) se obtuvieron los datos de precipitación mensual desde el inicio de operación de cada estación hasta el año 1978 o 1979. Esta información se actualizó hasta diciembre de 1993 o 1994, con base en los datos proporcionados por la Gerencia Estatal de la Comisión Nacional del Agua (Comisión Nacional del Agua) en San Luis Potosí.

En el análisis previo de la información disponible, se detectó que las estaciones La Morita y La Salitrera pre-

1. Estaciones pluviométricas utilizadas



2. Estaciones pluviométricas y sus registros de precipitación anual disponibles en la zona media del estado de San Luis Potosí

Número	Estación y clave de la C.N.A.	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	Número de años
1	Cárdenas (13)									45
2	Ciudad del Maíz (3)									51
3	Colonia Álvaro Obregón (1)									48
4	Presa Álvaro Obregón (10)									59
5	Rioverde (23)									71
6	Armadillo (8)									32
7	Cerritos (12)									30
8	Faro Gallinas									17
9	Lagunillas (50)									35
10	Nogal Oscuro (37)									27
11	Ojo Caliente (42)									27
12	Ojo de Agua (11)									31
13	Ojo de Agua Seco (17)									31
14	Paredes (16)									31
15	Paso de San Antonio (35)									35
16	Pastora (22)									29
17	Pedro Montoya (31)									25
18	Rayón (36)									31
19	San Antonio de los Guayabos (24)									30
20	San Francisco (14)									26
21	San Nicolás Tolentino (34)									30
22	Vigas (15)									31
23	Villa Juárez (45)									31

sentaban amplios periodos sin datos, cuya deducción además resultaría difícil, por ello se consideró conveniente no considerarlas, realizándose el estudio con 23 estaciones. En la ilustración 2 se muestran los periodos de información disponibles en cada estación, observándose que únicamente cinco estaciones cuentan con registros mayores de 45 años y que en su mayoría comenzaron a operar al inicio de los años sesenta, por lo cual comprenden sólo del orden de treinta años. Dos estaciones: Lagunillas y Paso de San Antonio presentan registros interrumpidos hacia 1978, pero por su ubicación son bastante importantes y por ello se tomaron en cuenta.

Estimación de datos faltantes

En primer término se estimaron los datos mensuales faltantes, adoptando la moda de los valores mensuales disponibles en ese mes. Lo anterior cuando únicamente se tenía uno o dos valores faltantes en cada mes y no en años seguidos. Para la estimación de la moda mensual se utilizó la función de distribución de probabilidades Pearson tipo III, con base en el programa en Basic denominado GAMIX (Campos, 1988a).

La estimación de precipitaciones mensuales permitió deducir algunos valores anuales faltantes; con respecto a los demás, cuando se trataba de un solo año, éstos fueron deducidos a través del método *U.S. Weather Service* de la distancia ponderada (Viessman *et al.*, 1977). Para la estimación de dos o más años, seguidos o no, se utilizó la técnica de la regresión lineal entre las dos estaciones más cercanas. En el cuadro 1 se presenta un resumen de los cálculos realizados.

Análisis de homogeneidad

El primer análisis que debe ser llevado a cabo cuando la información climatológica será utilizada con fines estadísticos son los estudios de homogeneidad, es decir, la búsqueda de tendencias, ciclos, persistencia y/u otras formas determinísticas de la fluctuación o pérdida de la aleatoriedad (WMO, 1971).

El procedimiento y programas utilizados corresponden a los establecidos por Campos (1992), los cuales comprenden 12 pruebas estadísticas: tres de carácter general conocidas como *test* de Helmer (TH), *test* de las Secuencias (TS) y prueba del Punto de Cambio (PPC); tres pruebas relacionadas con la persistencia

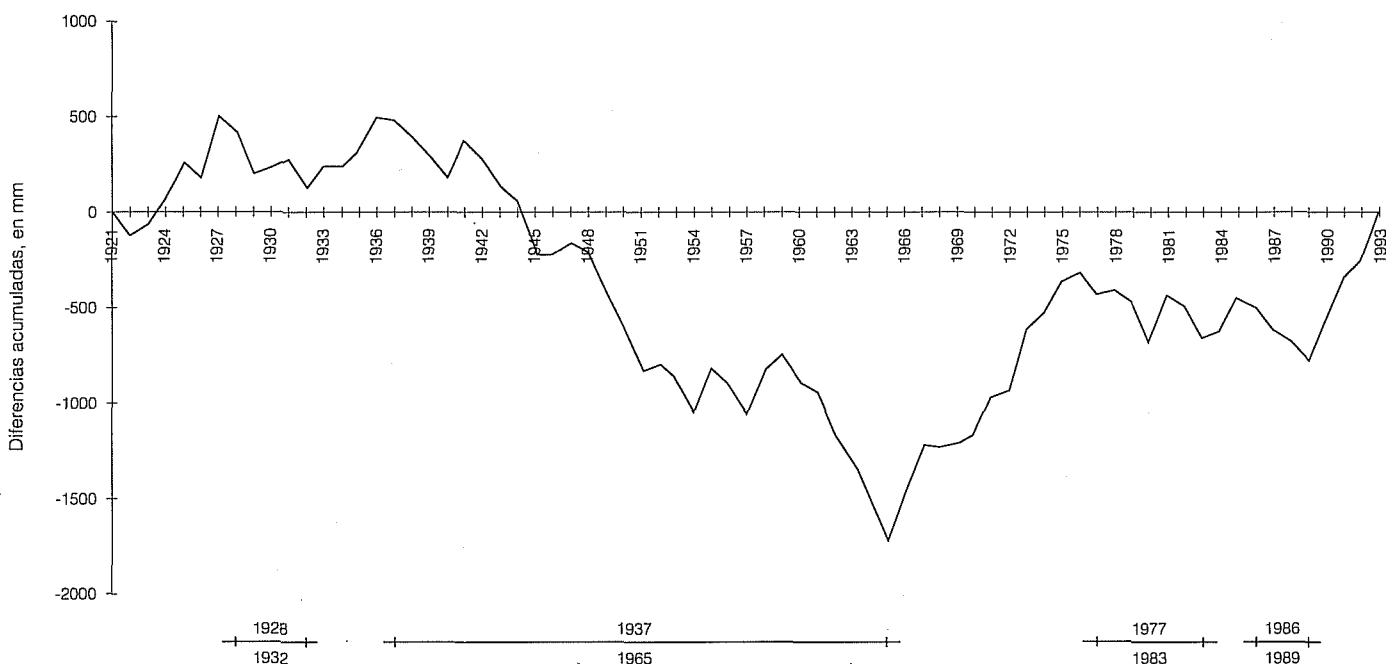
1. Resumen de las regresiones efectuadas para la estimación de precipitaciones anuales faltantes

Número	Estación Y	Estación X	Periodo Común	Pares	r	m	b	Años estimados
1	Armadillo	Villa Juárez	1962-1993	19	0.763	0.990	70.16	1978, 1979
2	Cárdenas	Rayón	1961-1993	21	0.911	0.667	175.90	1964
3	Cárdenas	Rioverde	1946-1993	21	0.670	0.826	201.40	1950, 1952
4	Cerritos	Villa Juárez	1963-1993	26	0.748	1.010	117.80	1964
5	Ciudad del Maíz	Colonia Álvaro Obregón	1942-1978	23	0.810	1.610	-34.20	1950, 1952
	Colonia Álvaro Obregón	Ciudad del Maíz						1985, 1986
6	Ojo de Agua	Cárdenas	1961-1993	21	0.686	0.940	554.70	1985, 1986
7	Ojo de Agua Seco	Rioverde	1961-1993	21	0.912	1.064	68.57	1985, 1986
8	Pedro Montoya	Rioverde	1966-1992	19	0.791	0.980	35.60	1985, 1986
9	Rayón	Cárdenas						1985, 1986
10	San Antonio de los Guayabos	Rayón	1961-1993	19	0.886	1.187	128.88	1985, 1986, 1987
11	San Francisco	Rioverde	1966-1993	18	0.789	0.390	151.40	1985, 1986
12	San Nicolás Tolentino	Villa Juárez	1962-1992	21	0.852	0.822	126.80	1978, 1979
13	Vigas	Rioverde	1962-1993	20	0.930	0.614	121.50	1985, 1986
14	Paredes	Rioverde	1961-1993	22	0.876	1.234	68.75	1985, 1986

que son el coeficiente de correlación serial de orden 1 (R1), la de Sneyers (SNY) y el Cociente de Von Neumann (CVN); dos pruebas de tendencia: la de Kendall (PK) y la de Spearman (PS); una relativa a cambios en la media, la de Cramer (PCR), y por último la de consistencia en la variabilidad o prueba de Bartlett (PB).

Los resultados se han concentrado en el cuadro 2, en el cual se indica con *H* si el registro resultó homogéneo en tal prueba y con *NH* si fue inhomogéneo. De los resultados se deduce que cuatro estaciones muestran inconsistencia detectada a través de persistencia: Faro Gallinas, Paredes, San Nicolás Tolentino y Vigas.

3. Curva masa residual anual de la estación pluviométrica Rioverde



2. Resultados de las pruebas de homogeneidad aplicadas a los datos de precipitación anual

Número	Nombre de la estación	FDP	TH	TS	PPC	RI	SNY	CVN	PK	PS	PB	PCR	Observaciones
1	Cárdenas	N	H	H	H	H	H	H	H	H	H	NH	CM
2	Ciudad del Maíz	LN	NH	H	H	H	H	H	H	H	H	H	
3	Colonia Álvaro Obregón	LN	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	
4	Presa Álvaro Obregón	LN	NH	H	H	H	H	H	H	H	NH	H	PEN y D
5	Rioverde	LN	NH	NH	H	H	H	H	H	H	H	H	
6	Armadillo	W	H	NH	H	H	NH	H	H	H	H	H	PE
7	Cerritos	N	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	
8	Faro Gallinas	LN	NH	NH	H	NH	NH	NH	H	H	H	NH	PE y CM
9	Lagunillas	LN	NH	H	H	H	NH	H	H	H	H	H	LPE
10	Nogal Oscuro	W	H	H	H	H	H	H	H	H	H	NH	CM
11	Ojo Caliente	LN	H	H	H	H	H	H	H	H	H	NH	CM
12	Ojo de Agua	N	H	H	H	H	H	H	H	H	H	NH	CM
13	Ojo de Agua Seco	LN	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	
14	Paredes	N	NH	H	H	NH	NH	NH	H	H	H	NH	PE y CM
15	Paso de San Antonio	LN	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	
16	Pastora	LN	H	H	H	H	H	H	H	H	NH	NH	LPEN, D y CM
17	Pedro Montoya	N	NH	H	H	H	H	H	H	H	H	H	
18	Rayón	W	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	
19	San Antonio de los Guayabos	W	NH	NH	H	H	H	H	H	H	H	H	
20	San Francisco	W	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	
21	San Nicolás Tolentino	LN	H	H	H	NH	H	NH	H	H	H	H	LPE
22	Vigas	N	NH	H	H	NH	NH	NH	H	H	H	H	LPE
23	Villa Juárez	N	H	NH	H	H	H	H	H	H	H	H	

Simbología:

FDP = Función de distribución de Probabilidades acumuladas
 TH = Test de Helmer
 TS = Test de las Secuencias
 PPC = Prueba del Punto de Cambio
 RI = coeficiente serial de orden 1
 SNY = prueba de Sneyers
 PEN = tendencia
 D = dispersión
 N, LN = FDP normal y log-normal

CVN = prueba del Cociente de Von Neuman
 PK = Prueba de Kendall
 PS = Prueba de Spearman
 PB = Prueba de Bartlett
 PCR = Prueba de Cramer
 CM = cambio en la media
 PE = persistencia
 LPE = ligera persistencia
 W = FDP Weibull

Se concluyó eliminar la estación Faro Gallinas por ser la de menor registro y presentar además cambios significativos en la media.

Detección de periodos de sequías**Método de Foley**

J. C. Foley en 1957 (WMO, 1975) propuso utilizar la curva masa residual de la precipitación anual (se puede aplicar a nivel mensual para obtener un mayor detalle), para detectar periodos de sequía y húmedos. Un periodo de sequía será aquel en que se comienzan a acumular diferencias negativas, produciendo en la cur-

va masa un tramo con pendiente descendente; el punto donde se empiezan a acumular diferencias positivas, corresponde al final del periodo seco. En la ilustración 3 se muestra una de las curvas obtenidas al hacer el análisis descrito. Mayores detalles de este método, como por ejemplo el cálculo del índice de severidad de cada sequía, con fines de caracterización de éstas, se pueden consultar en Campos(1991b).

Método de Gibbs y Maher

W. J. Gibbs y J. V. Maher en 1957 (WMO, 1975) definieron como años de sequía aquellos con lluvia menor al primer decil, es decir, con una probabilidad de no ex-

3. Precipitación esperada (mm) en meses consecutivos comenzando en el mes indicado

Estación: Cerritos										Periodo: 1963-1993 (31 años)			
Decil	Número de meses	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1	1	0	0	0	0	21	32	21	31	38	6	0	0
	2	3	2	0	37	84	93	101	96	74	15	4	4
	3	8	11	45	105	155	182	180	136	84	25	10	10
	4	20	60	114	182	238	255	227	149	102	42	18	16
	5	65	130	192	266	307	307	239	168	117	49	26	27
	6	144	211	275	339	357	321	255	186	123	61	40	80
	7	222	294	348	386	371	340	272	193	132	86	92	165
	8	307	370	394	399	393	363	279	202	165	141	178	248
	9	387	415	407	421	419	372	293	238	225	232	261	334
	10	432	428	428	448	429	382	320	300	319	314	348	416
	11	444	450	456	460	439	413	390	407	398	399	429	458
	12	467	477	468	469	469	480	502	499	482	474	470	469
2	1	1	1	0	0	31	48	43	44	53	13	3	1
	2	8	6	8	52	109	124	128	121	95	25	9	10
	3	15	20	62	133	193	219	216	166	107	39	19	19
	4	32	79	144	223	281	302	267	181	127	58	29	27
	5	87	161	235	312	361	357	280	201	144	68	39	43
	6	177	253	323	395	414	371	298	221	153	81	58	105
	7	268	341	405	445	429	392	317	229	163	109	118	200
	8	357	426	455	459	452	415	326	240	198	172	214	294
	9	445	475	469	481	477	427	341	277	264	270	308	384
	10	494	489	491	508	489	438	371	344	364	364	399	473
	11	508	512	518	521	500	471	444	454	455	452	487	520
	12	531	538	531	532	532	541	558	555	542	536	533	533
3	1	4	4	1	2	41	63	62	56	66	21	6	4
	2	14	10	17	67	130	153	152	142	113	36	14	17
	3	23	30	78	158	226	251	247	192	127	52	29	27
	4	44	95	171	258	318	341	301	208	148	74	40	37
	5	107	188	271	350	406	398	315	228	167	85	51	58
	6	206	290	362	441	461	414	335	250	178	99	75	127
	7	307	381	452	494	477	435	355	260	190	130	141	229
	8	399	472	505	509	500	459	366	273	226	198	245	333
	9	493	525	520	532	525	471	381	310	295	303	348	425
	10	545	540	543	558	539	484	413	381	401	405	441	520
	11	560	563	570	572	551	518	488	493	502	496	535	570
	12	583	589	584	584	584	591	603	601	591	587	585	584
5	1	14	10	8	22	64	96	102	80	93	40	13	13
	2	27	21	36	97	174	211	199	185	150	59	28	32
	3	40	51	111	208	292	312	306	242	167	80	49	47
	4	71	129	223	327	388	416	364	259	190	105	63	61
	5	148	240	342	423	491	476	381	282	213	120	78	91
	6	262	360	438	527	550	493	403	305	227	136	111	171
	7	382	455	542	586	568	516	426	320	242	172	188	286
	8	478	560	600	603	591	540	441	335	279	249	303	406
	9	583	618	617	626	615	555	456	372	356	363	423	502
	10	640	635	640	650	631	570	492	449	470	483	519	607
	11	658	658	665	666	645	606	570	565	589	577	624	664
	12	681	682	681	681	681	683	686	686	683	682	681	681

4. Precipitación esperada (mm) en meses consecutivos comenzando en el mes indicado

Estación: Lagunillas												Periodo: 1943-1977 (35 años)	
Decil	Número de meses	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1	1	0	0	0	0	9	39	23	16	55	30	1	1
	2	1	0	3	19	63	91	56	105	132	46	10	3
	3	3	7	25	79	115	135	169	189	153	63	16	7
	4	11	30	83	131	162	267	252	211	172	71	19	10
	5	35	86	136	184	299	350	274	229	185	76	23	19
	6	94	141	191	317	381	372	295	242	192	80	31	45
	7	150	197	324	400	403	395	311	249	199	93	63	108
	8	201	329	408	422	427	408	318	255	215	124	130	163
	9	332	414	430	447	440	416	325	269	243	206	187	213
	10	417	435	454	459	448	422	338	297	344	269	237	350
	11	438	459	466	467	454	434	367	400	408	320	376	435
	12	462	471	474	474	465	463	467	459	464	446	461	456
2	1	0	0	0	3	14	55	34	30	83	44	5	3
	2	4	2	7	27	83	115	81	147	172	64	16	8
	3	7	11	33	100	143	173	220	241	196	82	24	13
	4	18	39	105	161	204	326	311	264	215	92	29	17
	5	47	109	167	226	360	416	334	284	230	98	33	29
	6	120	172	233	379	449	440	356	298	237	103	44	59
	7	184	240	386	469	472	462	373	306	244	118	79	135
	8	247	392	477	492	495	476	380	313	262	151	159	198
	9	399	483	500	516	510	484	387	328	293	243	223	261
	10	490	506	523	530	518	491	403	359	399	312	286	417
	11	513	529	537	538	525	505	434	468	469	378	444	508
	12	536	543	545	545	538	536	540	533	537	523	535	531
3	1	2	1	1	6	19	69	45	44	110	58	8	6
	2	8	5	10	34	101	137	106	186	208	80	22	13
	3	12	16	41	119	168	206	265	287	233	99	32	19
	4	26	48	125	186	240	376	362	311	252	111	38	24
	5	58	130	193	263	412	471	386	331	268	117	43	38
	6	142	199	270	431	506	496	408	347	276	123	57	71
	7	213	277	439	527	531	518	425	354	284	139	94	159
	8	287	446	535	551	553	533	433	362	302	175	183	228
	9	455	541	559	573	568	541	440	379	335	274	254	302
	10	551	566	581	588	577	548	457	412	446	348	328	474
	11	575	588	596	597	584	564	490	524	520	423	501	569
	12	597	602	604	604	599	597	600	595	598	587	596	593
5	1	9	5	4	14	30	99	69	77	170	87	17	12
	2	17	10	19	49	136	180	158	268	280	112	35	25
	3	24	27	57	156	216	274	356	378	306	132	50	33
	4	42	65	163	236	311	474	461	404	326	148	58	40
	5	80	170	244	333	512	578	488	423	344	156	65	59
	6	187	251	341	532	616	604	507	442	352	164	82	97
	7	268	349	541	636	641	623	526	450	360	183	122	205
	8	364	548	644	662	661	641	534	458	380	221	231	286
	9	564	652	670	681	579	650	542	477	417	333	312	382
	10	668	677	689	699	687	657	561	514	433	415	408	582
	11	693	697	707	707	695	676	598	631	615	512	609	686
	12	713	714	715	715	713	713	714	712	713	709	712	711

5. Precipitación esperada (mm) en meses consecutivos comenzando en el mes indicado

Estación: Rioverde										Periodo: 1922-1993 (72 años)			
Decil	Número de meses	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1	1	0	0	0	0	8	18	20	16	35	8	1	0
	2	0	0	2	20	51	63	62	76	66	16	5	1
	3	2	6	24	64	100	118	131	111	78	26	9	3
	4	10	29	70	117	159	191	172	124	91	31	12	7
	5	35	73	123	182	229	234	186	136	97	34	15	15
	6	82	127	187	256	270	248	201	143	101	40	24	42
	7	134	192	262	296	285	262	210	147	106	57	51	90
	8	199	265	301	309	298	273	215	153	129	87	103	144
	9	272	305	315	323	309	278	221	176	160	144	159	211
	10	312	319	328	333	314	282	239	209	226	196	225	284
	11	326	332	339	339	318	301	274	274	277	258	300	324
	12	339	342	344	343	337	339	338	326	337	330	340	338
2	1	0	0	0	1	15	31	31	25	50	14	3	0
	2	2	2	6	30	70	86	81	98	85	24	9	4
	3	6	11	35	86	127	148	162	138	99	36	15	8
	4	17	40	92	147	191	230	205	152	112	42	18	12
	5	48	96	154	215	271	275	220	164	120	46	22	24
	6	106	158	222	298	314	290	235	173	124	53	35	56
	7	167	226	305	341	329	304	245	177	130	72	68	116
	8	325	309	347	355	343	315	250	183	155	107	130	178
	9	317	351	361	368	354	320	256	208	189	174	193	247
	10	359	365	374	379	359	326	277	244	263	233	262	329
	11	374	378	385	385	364	347	315	317	322	299	345	372
	12	387	389	391	390	385	387	386	377	386	380	387	387
3	1	1	0	0	4	22	44	42	35	63	21	5	2
	2	5	4	11	39	86	107	99	119	103	32	13	8
	3	10	16	46	105	151	173	188	160	117	45	21	13
	4	25	51	112	173	219	264	233	175	130	53	25	18
	5	60	117	181	244	306	310	248	188	139	57	29	33
	6	128	185	251	334	351	325	263	198	144	64	46	70
	7	195	256	341	378	366	338	273	202	151	86	82	138
	8	265	346	384	392	380	350	279	209	176	124	153	207
	9	355	389	399	406	391	356	285	235	214	199	222	278
	10	398	404	412	417	397	362	308	274	294	264	293	367
	11	413	417	424	423	403	385	348	352	359	332	383	411
	12	426	428	430	429	425	426	426	419	426	421	427	426
5	1	6	3	3	14	36	73	67	56	91	35	10	7
	2	12	9	22	60	120	151	135	159	137	50	22	17
	3	18	29	67	145	199	224	239	205	153	64	33	23
	4	41	74	153	225	271	328	286	221	166	75	38	30
	5	85	158	233	298	374	375	302	234	178	80	45	42
	6	171	239	306	402	420	391	316	246	183	88	68	97
	7	250	311	409	447	436	404	327	251	191	114	112	183
	8	323	415	455	463	449	416	333	259	218	158	199	263
	9	426	461	470	476	461	422	341	286	262	247	279	336
	10	472	476	483	488	467	429	367	330	352	325	351	439
	11	487	489	496	494	474	455	411	420	430	396	455	485
	12	500	501	501	501	500	500	500	498	500	499	501	500

cedencia menor al 10%. Para definir cuantitativamente los deciles se utilizó la distribución de probabilidades Pearson tipo III o Gamma mixta (Campos, 1988a), según la denominaciones siguientes:

Decil: Designación para la Precipitación Anual:

1	Extremadamente baja
2	Sensiblemente baja
3	Baja
4,5,6	Promedio
7	Alta
8	Sensiblemente alta
9	Extremadamente alta

Secuencias Mensuales de Precipitación

Este análisis consiste en integrar primeramente secuencias de uno a 12 meses, comenzando en cada mes del año. Cuando la secuencia que se integra abarca más allá de diciembre de ese año, se continúa en los meses iniciales del año siguiente. Las secuencias formadas se procesan probabilísticamente por medio de la distribución Gamma mixta (Campos, 1988a), para obtener las magnitudes de cada secuencia de n meses correspondiente a los deciles 1, 2, 3 y 5.

Este análisis únicamente se llevó a cabo en tres estaciones, consideradas representativas de las subregiones climáticas de la zona media (ver inciso Subregiones climáticas), éstas son: Cerritos, Lagunillas y Río Verde. Los resultados se tienen en los cuadros 3, 4 y 5. Estos datos son de enorme utilidad cuando se analiza la posibilidad de éxito de un cultivo, cuya estación de crecimiento y demanda son conocidos, ya que permiten tener una estimación del riesgo del temporal asociado con tal demanda (WMO, 1975).

Los valores de los cuadros 3, 4 y 5, permiten definir la precipitación esperada en un cierto número de meses consecutivos, los cuales empiezan en uno previamente especificado; por ejemplo, en cinco meses seguidos comenzando en abril de cada año y con una probabilidad de excedencia del 80%, ésto es un riesgo de falla del 20% (2o. decil), se obtiene 312, 226 y 215 mm, en Cerritos, Lagunillas y Río Verde, respectivamente.

Interpretación y aplicación de resultados

Subregiones climáticas

Las fórmulas climáticas según el Sistema de Köppen modificado fueron calculadas (Campos, 1988b) y se presentan en el cuadro 6, en la que además se han

6. Fórmula climática de las estaciones estudiadas según el sistema Köppen modificado

Zona*	Nombre de la estación	
1	Cerritos	BS1 h w" (e) g
	Villa Juárez	BS1 h w" (e) g
2	Pastora	BS0 h w" (e) g
	San Francisco	BS0 h w" (e) g
	Nogal Oscuro	BS1 h w" (e) g
	Paso de San Antonio	BS1 h w (w) (e) g
	Río Verde	BS1 h w" (w) (e) g
	Ojo de Agua Seco	BS1 h w" (e) g
3	Ciudad del Maíz	BS1 h w" (w) (e) g
	Colonia Álvaro Obregón	BS0 h w" (w) (e) g
	Presa Álvaro Obregón	BS1 h w" (w) (e) g
	Ojo de Agua	C (w2) b (i') g
	Cárdenas	BS1 h w" (w) (i') g
	Rayón	BS1 h w" (w) (e) g
4	Armadillo	BS1 k w" (e) g
	San Nicolás Tolentino	BS1 h w" (e) g
	San Luis Potosí	BW h w" (w) (e) g
	Ojo Caliente	BS0 h w" (e) g
5	Vigas	BS1 k w" (e) g
	Paredes	(A)C (w0) a (e) g
	San Antonio de los G.	A w0 (w) (e) g
	Pedro Montoya	BS1 (h') h w" (e) g
	Lagunillas	(A)C (w0) (w) a (e) g

- * 1 = Zona Norte
- 2 = Zona Centro;
- 3 = Zona Este
- 4 = Zona Oeste
- 5 = Zona Sur

agrupado las estaciones climatológicas analizadas por subregiones climáticas o zonas. Lo anterior permitió una mejor interpretación de los resultados de los métodos aplicados, como se muestra a continuación.

Resultados del Método de Foley

Estos se han concentrado en el cuadro 7 donde los años de sequía se indican sombreados. A partir de tales resultados se puede indicar que los periodos de sequía que han ocurrido son los siguientes:

Subregiones climáticas	Año	Zonas afectadas:
Las fórmulas climáticas según el Sistema de Köppen modificado fueron calculadas (Campos, 1988b) y se presentan en el cuadro 6, en la que además se han	1960 a 1965	Todas
	1969 a 1975	Norte y Centro
	1979 a 1989	Todas

7. Resultados de la aplicación del método de Foley para detectar periodos de sequía

Z o n a	Nombre de la estación	1	1	1	1	1	1	1	1
		9	9	9	9	9	9	9	9
		2	3	4	5	6	7	8	9
		0	0	0	0	0	0	0	0
1	Cerritos								
	Villa Juárez								
2	Pastora								
	San Francisco								
	Nogal Oscuro								
	Paso de San Antonio								
	Río verde								
	Ojo de Agua Seco								
3	Ciudad del Maíz								
	Colonia Álvaro Obregón								
	Presa Álvaro Obregón								
	Ojo de Agua								
	Cárdenas								
	Rayón								
4	Armadillo								
	San Nicolás Tolentino								
	San Luis Potosí								
	Ojo Caliente								
5	Vigas								
	Paredes								
	San Antonio de los G.								
	Pedro Montoya								
	Lagunillas								

Zona 1 = Zona Norte

Zona 4 = Zona Oeste

Zona 2 = Zona Centro

Zona 5 = Zona Sur

Zona 3 = Zona Este

En la interpretación de los resultados de este método se ha seguido un enfoque global en la definición de los periodos de sequía, por ejemplo en la ilustración 3 en el periodo 1937-1965, tal lapso pudo haber sido interpretado en dos periodos de sequía: 1937-1953 y 1959-1965.

Resultados del Método de Gibbs y Maher

De una tabulación similar al cuadro 7 en la que se han indicado con colores rojo, anaranjado y amarillo los años con precipitación extremadamente baja, sensiblemente baja y baja, respectivamente, se han deducido los resultados siguientes:

Año

Zonas afectadas:

1960	Todas, severamente
1962-1964	Todas, severamente
1965	Todas, sensiblemente
1969-1975	Norte, centro y Oeste, sensiblemente
1977	Todas, sensiblemente
1979	Sur, sensiblemente
1980	Todas, severamente
1982	Todas, sensiblemente
1983	Norte y Oeste, levemente
1986	Este, levemente
1987	Centro, Este y Sur, severamente
1989	Todas, severamente

En un trabajo previo, Campos(1991a) elaboró la tabulación similar al cuadro 7 utilizando la designación numérica de los deciles con una P (promedio) para los deciles 4, 5 y 6; en tal cuadro la atención se centra en los números 1, 2 y 3, para detectar los años de sequía y definir el área y la severidad de éstas.

Una ventaja de los resultados del método de Gibbs y Maher es que muestra el grado de intensidad de la sequía que afecta a la zona. Más allá de 1960 resulta poco confiable la definición de los periodos de sequía, ya que serían interpretados con sólo cinco registros pluviométricos.

Secuencias mensuales de resultados

Los resultados de los cuadros 3, 4 y 5 permiten una comparación de la severidad de las sequías entre las zonas que éstos representan. Por ejemplo, para duraciones de seis meses, trabajando en el decil 1, y comenzando en mayo, es decir, buscando el periodo lluvioso, se tiene que el mejor temporal ocurre en Lagunillas con 381 mm de lluvia disponible y segura (90% de confiabilidad); después en Cerritos con 357 mm y por último en Rioverde con sólo 270 mm de precipitación en tal lapso. Diversos arreglos de comparaciones como las anteriores, ayudarán a establecer las características de severidad de las sequías en las diferentes regiones o zonas.

Estudios posteriores o de caracterización de las sequías

Con el propósito de hacer comparaciones objetivas entre las sequías meteorológicas detectadas e intentar correlacionar índices de severidad de éstas con sus efectos, o las producciones observadas, resulta necesario continuar con los estudios de carácter cuantitativo (Sancho y Cervera y Pérez-Gavilán, 1978), denominados de *caracterización de sequías*. Se recomiendan las técnicas clásicas basadas en la precipitación y la temperatura como el método de Palmer (Palmer, 1965; Alley, 1984), otras más sencillas como el método de Herbst *et al.* (1966), expuesto, aplicado y comparado por Campos (1991c), o bien, aquéllas con enfoques energéticos (Hare, 1985).

Conclusiones

Los resultados de los métodos de Foley y de Gibbs y Maher son bastante similares, lo cual genera confiabilidad en los resultados aquí expuestos y en su aplicación futura, por ejemplo a toda la República Mexicana, para la detección de sequías continentales.

Una investigación histórica que fue realizada por el primer autor en la zona de San Ciró de Acosta (estación pluviométrica Pedro Montoya), permitió verificar los resultados aquí expuestos sobre los periodos de sequía y sobre la severidad detectada para los años 1962, 1979, 1980, 1982 y 1989, como los más críticos (Flores y Campos, 1995).

Los resultados expuestos en los cuadros 3, 4 y 5, relativos a las secuencias de precipitación mensual asociadas a una cierta probabilidad, constituyen una herramienta muy útil con fines de planeación agrícola, pues tales valores consideran implícitamente las condiciones de sequía, es decir, la bondad del temporal; por ello deben ser difundidos para su aplicación.

Se recomienda aplicar en la República Mexicana las técnicas de detección de sequías aquí expuestas con la idea de comprender y establecer su comportamiento continental. La ulterior caracterización de las sequías detectadas permitirá su comparación y asociación cuantitativa a los efectos adversos que generaron.

Agradecimientos

A la UASLP y al gobierno del estado de San Luis Potosí por el apoyo económico otorgado al primer autor para su estancia en el Centro de Investigación y Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la propia UASLP.

Al ingeniero Fernando Cervantes Rivera, coordinador de la carrera de Ingeniería Civil de la Unidad Zona Media de la UASLP por el apoyo brindado al primer autor, para realizar la estancia de investigación citada.

A la Gerencia Estatal de la CNA por la excelente disposición mostrada para proporcionar la información pluviométrica que permitió actualizar la base de datos utilizada en este estudio, la cual está disponible bajo la designación de archivo DASEQ en *Basic*.

Recibido: mayo, 1997
Aprobado: agosto, 1997

Referencias

- Alley, W. M. 1984. The Palmer drought severity index: limitations and assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23:1100-1109.
- Campos A., D.F. 1988a. Función de distribución de probabilidades gamma mixta: soluciones y aplicaciones. *Memorias del 10º Congreso Nacional de Hidráulica de la Asociación Mexicana de Hidráulica*, Tomo II, Subtema 6, páginas 318-322. Morelia, Michoacán, México.
- Campos A., D.F. 1988b. Programa en BASIC para determinar la fórmula climática según el sistema Köppen modificado. *Memorias del IV Congreso Nacional de Irrigación de la Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación, A.C.* páginas 127-132. Reynosa, Tamaulipas, México.

- Campos A., D.F. 1991a. Estudio de sequías en el altiplano potosino de la República Mexicana. *Acta Científica Potosina* XIII(1):85-98. San Luis Potosí, S.L.P., México: Editorial Universitaria Potosina.
- Campos A., D.F. 1991b. Análisis de sequías de la estación climatológica La Piedad, Tamaulipas. 1: Cálculos preliminares y enfoque probabilístico. *II Simposio Regional: Avances y perspectivas de la investigación del clima y del agua en el noroeste de México*. 7 y 8 de Octubre. Linares, Nuevo León, México.
- Campos A., D. F. 1991c. Análisis de sequías en la estación climatológica La Piedad, Tamaulipas. 2: Método de Herbst, Bredenkamp & Barker. *II Simposio Regional: Avances y perspectivas de la investigación del clima y del agua en el noreste de México*. 7 y 8 de Octubre. Linares, Nuevo León, México.
- Campos A., D.F. 1992. *Estudios de homogeneidad en las estaciones pluviométricas del altiplano potosino*. Centro de Investigación y Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la U.A.S.L.P. México, 37 pp.
- Campos A., D. F. 1996. Crecientes y sequías. Eventos hidrológicos extremos. *Ciencia y Desarrollo* XXII(127):33- 41. Marzo/abril. México, D.F., CONACYT.
- Dracup, J.A., K.S. Lee y E.G. Paulson. 1980. On the definition of droughts. *Water Resources Research* 16(2):297- 302.
- Flores V., I. y Campos A., D. F. 1995. Estudio de sequías en la zona media del estado de San Luis Potosí. *Primer Verano de la Ciencia*, pp. 191-194. San Luis Potosí, S.L.P., México. Editorial Universitaria Potosina.
- Hare, F. K. 1985. *Climate variations, drought and desertification*. Chapter 2: A measure of aridity: the dryness ratio. Publication No. 653, pp. 6-8. World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland.
- Herbst, P. H., D. B. Bredenkamp y H. M. G. Barker. 1966. A technique for the evaluation of drought from rainfall data. *Journal of Hydrology* 4:264-272.
- Palmer, W. C. 1965. *Meteorological drought*. Research Paper No. 45. Washington, D.C., U.S.A. U.S. Weather Bureau. 58p.
- Sancho y Cervera, J. y D. Pérez-Gavilán A. 1978. *Análisis de las sequías en México*. Documento No. 20 de la Comisión del Plan Nacional Hidráulico. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, D.F. 121p.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1980a. *Boletín climatológico no. 5, región hidrológica no. 26. Pánuco*, Tomos I y II. Subsecretaría de Planeación, México, D.F.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1980b. *Boletín climatológico no. 3, región hidrológica no. 37. El Salado*. Subsecretaría de Planeación, México, D.F.
- Secretaría de Gobernación. 1994. *Atlas nacional de riesgos*. Agentes perturbadores de origen hidrometeorológico: sequías, pp. 58-61. México, D.F.
- Viessman, W., J. W. Knapp, G. L. Lewis y T. E. Harbaugh. 1977. *Introduction to hydrology*. Chapter 2: Precipitation, theme 2-4: Point precipitation, pp. 33-35. New York, U.S.A. Harper & Row Publishers.
- WMO. World Meteorological Organization. 1971. *Climatic change*. Annex III: Standard test of significance to be recommended in routine analysis of climatic fluctuations, pp. 58-71. Technical Note No. 79. WMO-No.195. Geneva, Switzerland. Secretariat of the WMO.
- World Meteorological Organization. 1975. *Drought and agriculture*. Chapter 1: Introduction, pp. 1-11 y chapter 4: Methods of analysis, pp. 27-52. Technical Note No. 138, WMO-No.392. Geneva, Switzerland. Secretariat of the WMO.
- Yevjevich, V. 1988. Basic approaches to coping with floods and droughts. Invited speaker in the Water for World Development, *Proceedings of the VIth IWRA world congress on water resources*, Volume I, Special sessions: Natural hydrologic hazards, pp. 97-117. May 29-June 3. Ottawa, Canada.

Abstract

Flores, I. & D.F. Campos-Aranda. "Detection of droughts in the central region of the state of San Luis Potosí using monthly rainfall records" *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol XIII. Num. 2, pages 45-56. May-August, 1998.

The origin of regional droughts and a practical definition are briefly presented. The central portion of the state of San Luis Potosí is geographically defined in terms of the municipalities included in the region. Available pluviometric information and the method used to estimate missing annual and monthly data are offered. A homogeneity analysis, based on the annual precipitation, is then described, and twelve statistical tests applied. The Foley, and Gibbs & Maher methods, used for the detection drought periods, are described. This section also includes the probabilistic analysis of monthly precipitation sequences that begin with each month. The results are summarized and study conclusions provided.

Key words: Droughts, homogeneity, decile, monthly precipitation sequences.

Dirección institucional de autores:

Ignacio Flores, Daniel Francisco Campos Aranda

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Dr. Manuel Nava No. 8, Zona Universitaria CP. 78290, San Luis Potosí, SLP
Teléfono: (48) 17 33 81, Email: dcampos@deimos.tc.uaslp.mx