

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Análisis de sequías en el marco del Tratado sobre Aguas Internacionales de 1944.
<i>Autor / Adscripción</i>	Felipe Arreguín Cortés Mario López Pérez César Velázquez Mireles Raúl López Corzo Comisión Nacional del Agua, México
<i>Publicación</i>	Tecnología y Ciencias del Agua, 4(1): 117-148
<i>Fecha de publicación</i>	2013
<i>Resumen</i>	Se presenta el análisis de sequías en las cuencas de los ríos Colorado y Bravo, mediante el Índice de Escurrimientos Estandarizados (SDI, por sus siglas en inglés). Los resultados encontrados son importantes para el manejo conjunto del agua entre México y Estados Unidos en ambas cuencas, para satisfacer las demandas de sus habitantes, cumplir compromisos establecidos en el Tratado sobre Aguas Internacionales de 1944, y tomar las medidas necesarias ante el impacto del cambio climático sobre el ciclo hidrológico en la región.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1318

ANÁLISIS DE SEQUÍAS EN EL MARCO DEL TRATADO SOBRE AGUAS INTERNACIONALES DE 1944

• Felipe Arreguín-Cortés • Mario López-Pérez • César Velázquez-Mireles •
• Raúl López-Corzo •
Comisión Nacional del Agua, México

Resumen

Se presenta el análisis de sequías en las cuencas de los ríos Colorado y Bravo, mediante el Índice de Escurrimientos Estandarizados (SDI, por sus siglas en inglés). En el río Colorado se registraron tres años con sequía extrema (1934, 1977 y 2002) en la cuenca total y en la región alta de la misma, y cuatro años (1928, 1929, 1935 y 1936) en la cuenca baja. Aplicando este mismo criterio, en el caso del río Bravo se registró una sequía extrema para el periodo k_3 (octubre-junio) en el año agrícola 1901-1902. El Índice de Precipitación Estandarizada (SPI, por sus siglas en inglés) sólo se aplicó en la cuenca del río Colorado, y se encontró una coincidencia de sequía extrema entre la cuenca baja y total en los años 1950, 1956 y 1989; además, en este último año, también hubo sequía extrema en la cuenca alta. Tales resultados son importantes para el manejo conjunto del agua entre México y Estados Unidos en ambas cuencas, para satisfacer las demandas de sus habitantes, cumplir compromisos establecidos en el Tratado sobre Aguas Internacionales de 1944, y tomar las medidas necesarias ante el impacto del cambio climático sobre el ciclo hidrológico en la región.

Palabras clave: sequía, disponibilidad, ríos Colorado y Bravo, indicadores de sequía.

Introducción

La actual sequía —años 2011, 2012— ha obligado a replantear la forma en que se atiende este fenómeno recurrente en la república mexicana (Arreguín, 2012). Es de particular interés su atención en la frontera norte, por las consecuencias que tiene sobre el territorio nacional, sometido a una marcada aridez; a la obligación de satisfacer tanto las demandas de su población como de cumplir con el Tratado sobre distribución de aguas internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América de 1944, y a la creciente información sobre los efectos del cambio climático en los patrones y cantidad de lluvia y escurrimiento en esa región, que necesariamente obliga a optimizar el uso del agua.

Existen varias clasificaciones de sequía, la más conocida las divide en meteorológica, hi-

drológica y agrícola. La primera es aquella que se presenta cuando la precipitación durante un cierto periodo de tiempo es significativamente menor que el promedio en un plazo largo o que un valor crítico establecido. Se caracteriza por la presencia de altas temperaturas, baja humedad en el ambiente y vientos fuertes.

La sequía hidrológica ocurre cuando existe un déficit de agua, de precipitación y escurrimiento superficial y subterráneo. Ésta puede causar severos daños a la población, ya que sus efectos y recuperación son a largo plazo.

La sequía agrícola sucede cuando no existe en cierto tiempo la suficiente humedad en el suelo que satisfaga las necesidades para el desarrollo óptimo de los cultivos.

La evaluación de la sequía se realiza a partir de indicadores que dependen de factores como la precipitación media anual o mensual, la temperatura, evaporación, evapotranspiración,

pérdida de humedad del suelo o humedad antecedente del mismo. Los índices que se usan con más frecuencia son los siguientes: un porcentaje de la normal climatológica, la variabilidad de la precipitación anual, algunos deciles de la precipitación, el Índice de Sequía de Palmer (PDSI), el Índice de Palmer de Sequía Hidrológica (PHDI), el Índice de Humedad en los Cultivos (CMI), el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI), o el Índice de Escurrimientos Estandarizados (SDI) (todas las siglas se refieren al idioma inglés). Estos indicadores se usan para determinar la severidad de las sequías y generar mapas de zonas vulnerables a la ocurrencia de ellas.

Asimismo, se han desarrollado diversos sistemas de monitoreo de la sequía con distintos niveles de detalle. Destacan por su carácter nacional y con sistemas en tiempo real, el Drought Monitor (Estados Unidos); el NOAA Drought Information Center, del National Oceanic and Atmospheric Administration (Estados Unidos), y el Drought Watch (Canadá). En el ámbito regional existen el Drought Monitoring Center (África), y el North American Drought Monitor, implementado por diversas instituciones de Canadá, Estados Unidos de América del Norte y México desde el año 2002 (Muñoz y Núñez, 2004).

El Tratado sobre distribución de aguas internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América de 1944 hace referencia a una extraordinaria sequía, pero no la define; ha habido varios intentos por precisar este término para las cuencas de los ríos Colorado y Bravo, pero ninguno de ellos ha sido aceptado como oficial por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA).

La sequía en las cuencas de los ríos Colorado y Bravo

Para evaluar la ocurrencia de la sequía, con la información sobre precipitación y escurrimientos validada por México y los Estados Unidos, se seleccionaron los métodos del SPI

y del SDI. Cabe citar que no se consideraron las aguas subterráneas para las metodologías citadas.

Método del SPI

Fue desarrollado por Mckee et al., en 1995. Es un índice basado en la probabilidad de precipitación para cualquier escala de tiempo, por lo cual sólo depende de series históricas de precipitación, con lo que es posible identificar los impactos de la sequía en periodos de corto, mediano y largo plazos. Sin embargo, la experiencia indica que como mínimo se deben emplear datos de precipitación mensual.

Para facilitar la obtención de los valores de Z o SPI, se utiliza la metodología desarrollada por Abramowitz y Stegun (1965), la cual convierte la probabilidad acumulada a la variable normalizada Z, como se describe a continuación:

$$Z = SPI = \mp \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right)$$

$$\text{Donde } t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(H(x))^2} \right)} \text{ para } 0 < H(x) \leq 0.5 \text{ o}$$

$$\sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1.0 - H(x))^2} \right)} \text{ para } 0.5 < H(x) \leq 1.0, \text{ y las}$$

probabilidades acumuladas empíricas se encontraron óptimamente como lo sugirieron Panofsky y Brier (1958). En este proceso, los datos de la precipitación se ordenan de forma creciente, para que el valor de k sea k_{-1} desde el valor más bajo y n sea el tamaño de la muestra: $H(x) = H(x) = k/n + 1$, además:

$$c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, \\ d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$$

Finalmente, los valores que adquiere el SPI representan la condición hídrica actual respec-

to a la serie histórica. Se clasifica en categorías, como se muestra en el cuadro 1.

Método del SDI

Para definir la sequía en función de los caudales de ríos, Nalbantis (2008) y Nalbantis y Tsakiris (2009) desarrollaron un índice similar al SPI, denominado *Streamflow Drought Index* (SDI).

Por lo general, el escurrimiento sigue una probabilidad de distribución sesgada, la cual puede aproximarse a la familia de las funciones de distribución gamma. La distribución es entonces normalizada. En este trabajo se usaron dos parámetros de distribución log normal de los escurrimientos.

El índice SDI se define como:

$$SDI_{i,k} = \frac{y_{i,k} - \bar{y}_k}{S_{y,k}} \quad i = 1, 2, \dots, \quad k = 1, 2, 3, 4$$

Donde $y_{i,k} = \ln(V_{i,k})$ $i = 1, 2, \dots, k = 1, 2, 3, 4$; e $y_{i,k}$ son los logaritmos naturales de escurrimiento acumulado con media \bar{y}_k y desviación estándar $S_{y,k}$.

El SPI es el número de veces que un valor concreto del escurrimiento acumulado en un periodo de tiempo se separa de la media de la serie, medido en unidades de desviación típica. En el SDI, cada valor es comparado con todos los registros existentes, preferentemente mensual o, en su caso, anual.

Ya que al igual que el SPI, el SDI trata de estadísticas en vez de valores, su aplicación es factible para estudiar zonas secas o húmedas. La clasificación por categorías del SDI se muestra en el cuadro 2.

Como se observa, la sequía extrema se produce cuando el índice SDI es menor que -2, con una probabilidad de 2.3%, equivalente a un periodo de retorno del orden de los 43.5 años.

Cuadro 1. Clasificación del SPI por categorías y su probabilidad de ocurrencia.

Valor SPI	Categoría	Probabilidad (%)
2.00 o mayor	Extremadamente húmedo (HE)	2.3
1.50 a 1.99	Muy húmedo (MH)	4.4
1.00 a 1.49	Moderadamente húmedo (HM)	9.2
0.99 a -0.99	Normal (N)	68.2
-1.00 a -1.49	Sequía moderada (SM)	9.2
-1.50 a -1.99	Sequía intensa (SI)	4.4
-2.00 o menor	Sequía extrema (SE)	2.3

Cuadro 2. Definición de estados de la sequía hidrológica mediante el SDI.

Criterio	Descripción	Probabilidad (%)	Periodo de retorno
> 0.0	Sin sequía (SinS)	50.5	2 años
-1.0 a 0.0	Sequía ligera (SL)	34.1	2.9 años
-1.5 -1.0	Sequía moderada (SM)	9.2	10.9 años
-2.0 a -1.5	Sequía severa (SS)	4.4	22.7 años
< a -2.0	Sequía extrema (SE)	2.3	43.5 años

Cuenca del río Colorado

Análisis de precipitación

Se utilizó el método del SPI con los registros de precipitación de cincuenta estaciones climatológicas de la cuenca, proporcionadas por Howard Diamond del World Data Center for Meteorology de la NOAA, en Estados Unidos, y de las 72 estaciones mexicanas, tal como se muestra en la figura 1.

Se obtuvieron las precipitaciones por estado y su porcentaje correspondiente para las cuencas completa, alta y baja del río Colorado, estas dos últimas tomando como punto de

división Lee's Ferry, como se muestra en el cuadro 3.

Utilizando estas precipitaciones y la metodología del SPI₁₂ meses, se obtuvieron los resultados que se muestran en el cuadro 4.

Con los datos de los cuadros 3 y 4 se graficaron los valores de precipitación y del SPI₁₂ (ver figuras 2 y 3).

Como se observa en las figuras 2 y 3, en la cuenca completa del río Colorado, para todo el periodo de análisis, en sólo tres años se han presentado sequías extremas (1956, 2002 y 2010), ya que han estado por debajo del umbral, es decir con un SPI < -2, o menor a

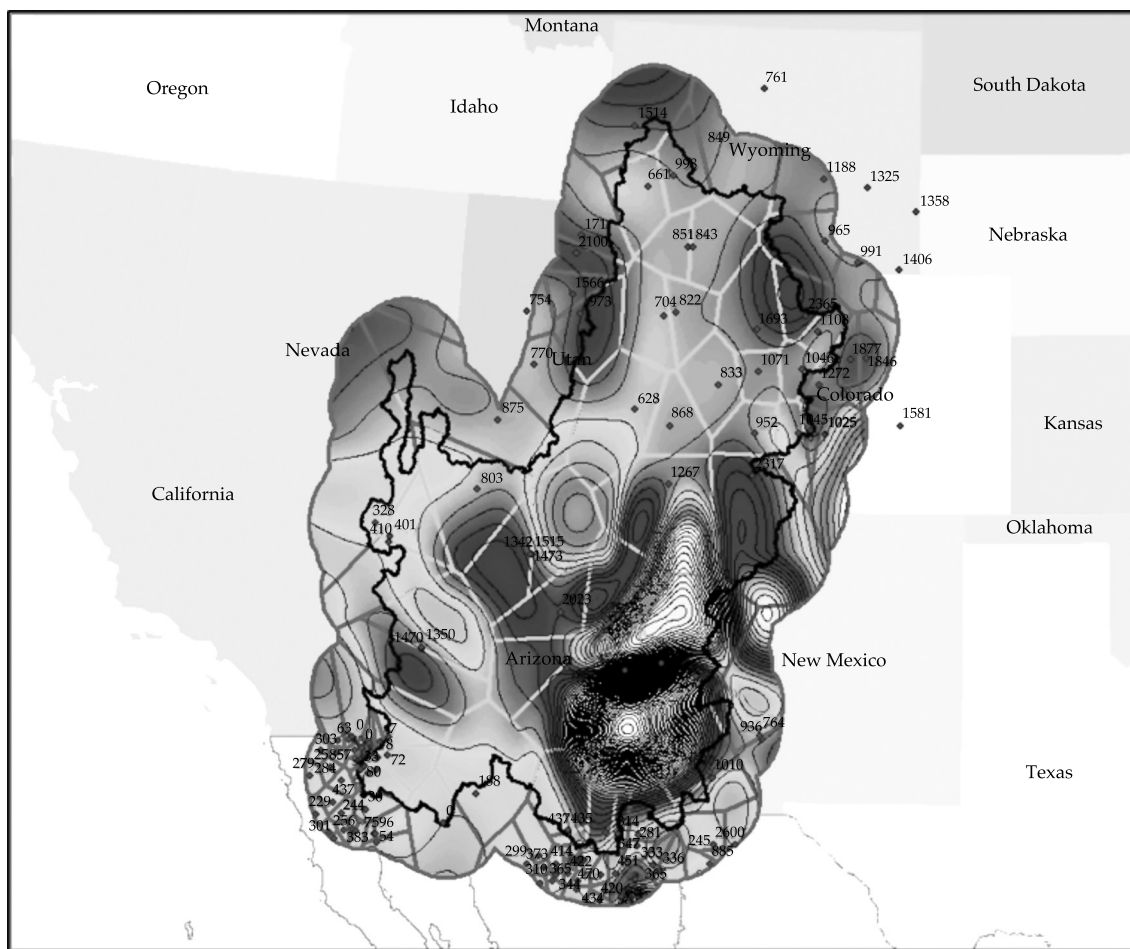


Figura 1. Localización geográfica y polígonos de Thiessen de las estaciones climatológicas.

Cuadro 3. Registros históricos de precipitación por estado, y su correspondiente para la cuenca alta, baja y total del río Colorado.

Año	Precipitación en pulgadas por estado (porcentaje de superficie estatal en la cuenca)								Precipitación media cuenca alta	Precipitación media cuenca baja	Precipitación media cuenca Colorado
	Wyoming	Colorado	Nuevo México	Utah	Arizona	Nevada	California				
<i>fa</i>	0.19	0.34	0.08	0.32	0.06	0.00	0.00				
<i>fb</i>	0.00	0.00	0.10	0.03	0.74	0.09	0.03				
<i>fc</i>	0.09	0.16	0.09	0.17	0.43	0.05	0.02				
1908	1 786.30	1 659.40	1 160.25	1 313.71	1 389.57	617.50	1 933.00	1 514.71	1 297.18	1 397.36	
1909	1 701.40	1 937.80	1 155.25	1 686.43	1 285.71	909.00	4 496.29	1 706.94	1 329.98	1 503.57	
1910	1 272.70	1 319.80	849.50	1 010.43	923.14	555.00	1 792.43	1 147.98	901.27	1 014.88	
1911	1 417.20	1 807.80	1 620.25	1 168.57	1 479.71	794.25	3 130.43	1 490.87	1 453.81	1 470.88	
1912	1 858.30	1 788.80	1 240.75	1 254.14	1 278.43	751.00	2 350.00	1 553.41	1 244.44	1 386.72	
1913	1 599.90	1 653.00	1 310.50	1 158.29	1 013.57	1 015.25	2 756.86	1 415.98	1 087.02	1 238.51	
1914	1 230.70	1 861.80	1 753.88	1 202.86	1 519.71	849.00	3 318.00	1 497.90	1 507.81	1 503.25	
1915	1 981.30	1 925.00	1 564.63	1 164.86	1 484.86	726.00	3 397.71	1 634.06	1 453.37	1 536.58	
1916	1 430.80	1 754.80	1 482.88	1 423.00	1 630.71	905.00	3 765.29	1 555.35	1 588.83	1 573.42	
1917	1 418.10	1 385.00	851.00	1 032.00	1 231.71	650.50	1 639.71	1 224.10	1 135.97	1 176.56	
1918	1 610.70	1 749.20	1 359.75	1 252.14	1 396.43	863.50	2 310.57	1 508.55	1 352.81	1 424.53	
1919	1 130.70	1 644.00	1 835.88	1 029.29	1 838.14	671.00	2 014.29	1 374.42	1 693.98	1 546.82	
1920	1 436.40	1 646.60	1 298.38	1 447.43	1 184.86	812.50	2 741.00	1 485.03	1 203.16	1 332.96	
1921	1 282.90	1 823.60	1 494.13	1 317.00	1 354.43	755.25	2 776.14	1 500.27	1 339.68	1 413.63	
1922	1 457.30	1 440.40	945.63	1 303.14	1 234.14	863.00	2 908.71	1 346.01	1 210.60	1 272.96	
1923	1 931.70	2 075.20	1 708.00	1 205.29	1 541.57	816.50	1 399.71	1 704.11	1 462.91	1 573.98	
1924	1 315.20	1 322.40	976.25	939.57	818.29	492.50	1 781.29	1 138.26	827.25	970.47	
1925	1 584.30	1 599.20	1 257.63	1 311.57	1 212.43	941.00	2 065.29	1 451.81	1 208.33	1 320.45	
1926	1 493.30	1 637.60	1 528.25	1 082.29	1 535.71	629.00	2 876.29	1 415.40	1 461.51	1 440.28	
1927	1 840.40	1 913.80	1 233.63	1 464.14	1 429.57	695.25	2 727.29	1 669.01	1 368.16	1 506.70	
1928	1 440.40	1 691.20	1 303.88	934.14	777.29	438.75	1 901.71	1 311.05	826.61	1 049.70	
1929	1 500.80	1 724.20	1 457.63	1 200.71	984.14	534.50	1 485.29	1 445.24	1 000.72	1 205.42	
1930	1 485.80	1 680.40	1 346.50	1 380.29	1 458.57	922.25	1 915.43	1 505.04	1 396.09	1 446.26	
1931	1 164.60	1 198.80	1 811.38	907.71	1 862.00	802.25	2 303.71	1 189.16	1 725.73	1 478.64	
1932	1 368.80	1 234.60	1 517.25	1 200.14	1 257.57	713.25	1 484.57	1 274.04	1 226.14	1 248.19	
1933	1 268.00	1 399.20	1 263.13	939.71	1 054.00	591.25	1 918.29	1 193.44	1 043.05	1 112.30	
1934	1 176.50	939.80	939.88	898.71	951.71	634.75	1 687.14	972.87	932.10	950.87	
1935	1 234.90	1 414.00	1 401.63	984.29	1 459.71	713.25	2 065.57	1 242.61	1 374.74	1 313.89	
1936	1 348.00	1 415.00	1 259.25	1 489.57	1 322.43	841.00	2 427.57	1 407.68	1 296.81	1 347.86	
1937	1 578.00	1 241.80	1 339.25	1 318.00	1 187.00	683.75	2 812.14	1 335.85	1 194.75	1 259.73	
1938	1 544.70	1 739.40	1 322.88	1 384.71	1 184.71	1 021.50	2 933.29	1 519.35	1 228.08	1 362.21	
1939	1 086.80	1 012.60	1 243.75	1 039.71	1 326.86	828.00	1 535.71	1 073.83	1 258.22	1 173.31	
1940	1 479.70	1 475.20	1 446.38	1 477.71	1 619.00	949.00	3 378.00	1 483.25	1 571.52	1 530.87	
1941	1 853.30	2 170.80	2 649.38	1 996.57	1 995.14	1 288.25	3 494.29	2 082.21	2 017.91	2 047.52	
1942	1 578.00	1 877.60	1 427.25	1 013.43	846.29	614.75	2 352.14	1 441.15	921.13	1 160.60	
1943	1 316.00	1 367.40	1 119.00	1 222.14	1 136.14	901.25	2 330.14	1 276.07	1 139.21	1 202.24	
1944	1 639.80	1 640.20	1 368.50	1 257.29	1 244.71	748.50	2 351.00	1 470.09	1 231.59	1 341.42	
1945	1 776.50	1 619.40	919.25	1 393.43	1 090.43	1 085.75	2 687.71	1 486.81	1 118.40	1 288.05	
1946	1 606.30	1 681.40	1 272.00	1 336.14	1 295.43	913.75	1 731.00	1 498.28	1 260.30	1 369.89	
1947	1 647.70	1 721.80	1 031.50	1 348.29	803.86	518.75	1 347.86	1 474.22	824.98	1 123.96	
1948	1 359.30	1 420.60	1 191.63	1 092.14	891.86	568.75	2 016.29	1 251.75	921.11	1 073.37	

Cuadro 3 (continuación). Registros históricos de precipitación por estado, y su correspondiente para la cuenca alta, baja y total del río Colorado.

Año	Precipitación en pulgadas por estado (porcentaje de superficie estatal en la cuenca)								Precipitación media cuenca alta	Precipitación media cuenca baja	Precipitación media cuenca Colorado
	Wyoming	Colorado	Nuevo México	Utah	Arizona	Nevada	California				
<i>fa</i>	0.19	0.34	0.08	0.32	0.06	0.00	0.00				
<i>fb</i>	0.00	0.00	0.10	0.03	0.74	0.09	0.03				
<i>fc</i>	0.09	0.16	0.09	0.17	0.43	0.05	0.02				
1949	1 405.60	1 650.20	1 486.38	1 391.71	1 213.71	741.25	1 547.57	1 479.61	1 200.94	1 329.27	
1950	1 443.40	1 189.80	1 007.13	941.00	704.86	709.25	2 817.43	1 113.79	794.98	941.80	
1951	1 485.80	1 607.80	969.13	1 376.57	1 522.43	772.50	2 456.71	1 451.82	1 408.46	1 428.43	
1952	1 137.50	1 281.60	1 109.00	1 175.43	1 408.86	888.50	2 922.86	1 213.09	1 354.94	1 289.62	
1953	1 242.10	1 324.20	936.50	979.57	747.29	472.25	1 738.86	1 130.10	768.85	935.21	
1954	1 054.00	1 069.00	1 085.63	1 085.43	1 197.43	618.50	2 317.71	1 080.60	1 150.86	1 118.50	
1955	1 439.50	1 232.60	1 084.00	1 082.29	1 181.14	823.75	2 477.14	1 208.56	1 161.87	1 183.37	
1956	1 074.80	1 049.80	655.63	744.86	554.43	562.50	1 838.14	893.57	602.13	736.34	
1957	1 614.20	2 009.20	1 588.13	1 606.14	1 430.00	903.00	2 497.00	1 733.09	1 419.79	1 564.07	
1958	1 240.90	1 516.20	1 613.88	969.86	1 377.29	764.50	2 834.43	1 286.48	1 359.76	1 326.02	
1959	1 159.80	1 566.40	1 284.75	1 044.43	1 344.00	567.00	1 598.71	1 282.90	1 252.80	1 266.66	
1960	1 001.60	1 364.80	1 413.63	986.29	937.71	719.50	2 149.86	1 150.74	990.89	1 064.51	
1961	1 254.50	1 707.20	1 346.75	1 182.00	1 069.00	667.75	1 628.29	1 381.97	1 068.80	1 213.02	
1962	1 452.50	1 292.40	1 221.25	1 002.29	960.86	711.50	2 412.29	1 203.58	996.68	1 091.96	
1963	1 451.20	1 327.80	1 104.50	1 169.00	1 179.29	938.50	2 580.00	1 272.88	1 178.65	1 222.04	
1964	1 422.70	1 254.00	1 008.75	1 169.14	1 068.57	737.00	2 338.00	1 227.60	1 061.79	1 138.15	
1965	1 424.50	1 997.00	1 521.88	1 613.29	1 882.29	1 100.50	2 342.29	1 716.75	1 763.67	1 742.06	
1966	1 118.20	1 244.60	1 148.38	969.43	1 094.43	556.00	1 908.86	1 114.39	1 059.47	1 084.76	
1967	1 648.20	1 654.20	1 278.88	1 307.57	1 429.00	931.50	2 546.71	1 496.54	1 383.86	1 435.75	
1968	1 444.20	1 288.60	1 208.25	1 247.43	1 017.00	780.50	2 095.71	1 282.13	1 042.36	1 152.77	
1969	1 206.60	1 898.80	1 613.38	1 374.71	1 242.14	1 097.25	3 186.71	1 532.87	1 312.54	1 414.00	
1970	1 419.80	1 440.40	1 018.50	1 248.71	1 105.14	871.00	2 636.14	1 319.39	1 113.12	1 208.11	
1971	1 606.00	1 439.40	1 322.75	1 297.29	1 129.29	869.00	1 853.00	1 397.14	1 139.77	1 258.29	
1972	1 466.10	1 496.00	1 656.13	1 200.43	1 337.71	722.25	1 779.43	1 398.44	1 308.20	1 349.76	
1973	1 563.20	1 608.20	1 181.13	1 325.57	1 076.71	864.25	2 985.71	1 440.77	1 119.27	1 267.32	
1974	1 088.90	1 188.20	1 437.13	906.43	1 083.29	674.25	2 151.14	1 092.30	1 094.72	1 093.60	
1975	1 435.30	1 403.40	1 263.25	1 274.29	1 007.00	876.25	2 175.57	1 332.20	1 052.13	1 181.10	
1976	1 291.30	1 233.80	1 096.75	817.00	1 242.43	867.75	1 227.00	1 099.61	1 169.29	1 137.20	
1977	1 372.60	1 328.40	1 266.13	1 037.86	1 055.57	783.50	1 801.29	1 221.43	1 062.02	1 135.43	
1978	1 590.50	1 417.80	1 598.63	1 578.29	2 135.71	1 213.75	2 878.14	1 561.45	1 983.80	1 789.31	
1979	1 099.40	1 728.80	1 422.13	1 051.00	1 238.57	850.25	2 531.86	1 333.74	1 240.14	1 283.24	
1980	1 373.20	1 487.60	1 160.13	1 645.86	1 406.29	1 097.75	2 516.86	1 484.68	1 380.66	1 428.56	
1981	1 376.40	1 612.20	1 464.75	1 416.29	1 192.14	878.25	2 731.14	1 465.84	1 229.41	1 338.29	
1982	1 741.30	1 696.60	1 448.00	1 714.86	1 653.57	1 201.25	3 447.57	1 687.98	1 630.03	1 656.71	
1983	1 541.30	1 754.00	1 408.63	1 965.71	1 935.86	1 477.25	4 529.43	1 763.93	1 899.72	1 837.19	
1984	1 338.20	1 709.00	1 689.25	1 451.00	1 611.29	1 045.25	1 853.00	1 546.75	1 554.44	1 550.90	
1985	1 199.10	1 678.00	1 709.13	1 324.43	1 386.14	707.75	1 593.43	1 456.48	1 346.66	1 397.23	
1986	1 536.40	1 643.60	2 028.25	1 415.86	1 362.43	744.75	2 607.14	1 564.08	1 394.51	1 472.60	
1987	1 304.10	1 665.80	1 475.88	1 341.43	1 298.29	1 003.25	1 977.29	1 453.44	1 297.39	1 369.25	
1988	963.20	1 467.80	1 620.13	1 015.71	1 243.57	712.00	1 707.14	1 223.65	1 225.96	1 224.90	
1989	1 313.90	1 300.60	1 070.13	797.57	787.14	612.50	1 615.71	1 090.60	815.08	941.96	

Cuadro 3 (continuación). Registros históricos de precipitación por estado, y su correspondiente para la cuenca alta, baja y total del río Colorado.

Año	Precipitación en pulgadas por estado (porcentaje de superficie estatal en la cuenca)								Precipitación media cuenca alta	Precipitación media cuenca baja	Precipitación media cuenca Colorado
	Wyoming	Colorado	Nuevo México	Utah	Arizona	Nevada	California				
<i>fa</i>	0.19	0.34	0.08	0.32	0.06	0.00	0.00				
<i>fb</i>	0.00	0.00	0.10	0.03	0.74	0.09	0.03				
<i>fc</i>	0.09	0.16	0.09	0.17	0.43	0.05	0.02				
1990	1 287.20	1 804.60	1 583.13	1 095.00	1 373.86	728.25	1 478.43	1 431.50	1 316.82	1 369.63	
1991	1 468.30	1 689.40	1 806.50	1 230.57	1 337.86	783.75	2 084.71	1 487.03	1 337.98	1 406.61	
1992	1 312.80	1 629.40	1 576.88	1 229.43	1 927.57	873.50	2 409.00	1 453.17	1 771.51	1 624.91	
1993	1 670.70	1 677.80	1 415.00	1 543.00	1 805.00	865.75	2 815.14	1 619.00	1 685.35	1 654.80	
1994	1 229.50	1 468.80	1 483.88	1 273.43	1 239.71	742.50	1 820.57	1 346.97	1 224.07	1 280.67	
1995	1 733.60	1 871.80	1 155.13	1 492.00	1 147.14	1 073.00	3 643.00	1 619.43	1 212.01	1 399.63	
1996	1 432.70	1 645.40	1 393.00	1 347.86	842.43	919.75	3 446.00	1 438.75	984.26	1 193.55	
1997	1 651.80	1 955.00	1 859.25	1 566.71	1 227.71	811.75	2 143.43	1 719.16	1 276.00	1 480.08	
1998	1 713.20	1 639.20	1 371.00	1 674.86	1 435.00	1 361.75	3 759.86	1 630.41	1 482.42	1 550.57	
1999	1 387.40	1 793.00	1 448.00	1 129.57	1 027.14	632.75	1 813.00	1 425.75	1 047.76	1 221.82	
2000	1 224.30	1 427.60	1 347.88	1 267.71	1 159.43	804.25	2 256.86	1 313.96	1 169.03	1 235.77	
2001	1 070.10	1 507.60	1 154.75	1 081.71	1 106.00	688.75	2 345.00	1 232.37	1 096.68	1 159.17	
2002	1 074.20	954.40	1 210.63	820.57	626.43	463.00	1 976.57	935.47	706.24	811.80	
2003	1 272.40	1 382.40	905.88	1 094.43	1 087.00	770.00	2 165.00	1 211.02	1 061.40	1 130.30	
2004	1 246.80	1 637.00	1 722.38	1 434.00	1 429.57	996.50	2 200.86	1 490.76	1 427.30	1 456.52	
2005	1 508.50	1 539.60	1 436.75	1 624.00	1 423.00	1 193.25	3 091.71	1 545.27	1 443.97	1 490.62	
2006	1 119.50	1 600.20	1 648.75	1 341.86	952.43	791.25	2 458.86	1 388.84	1 050.97	1 206.56	
2007	1 337.40	1 611.40	1 426.50	1 057.86	1 109.14	607.75	1 398.43	1 334.20	1 090.45	1 202.70	
2008	1 426.40	1 438.80	1 357.88	1 091.43	1 358.14	629.00	1 814.86	1 312.74	1 283.61	1 297.03	
2009	1 467.40	1 715.40	1 183.50	1 098.00	746.86	712.50	1 806.00	1 365.61	820.08	1 071.30	
2010	918.20	916.40	854.00	683.14	869.57	475.25	1 604.57	833.48	838.97	836.44	
prom	1 409.01	1 547.01	1 345.83	1 233.03	1 248.66	802.76	2 346.64	1 384.37	1 236.45	1 304.57	
máx	1 981.30	2 170.80	2 649.38	1 996.57	2 135.71	1 477.25	4 529.43	2 082.21	2 017.91	2 047.52	
mín	918.20	916.40	655.63	683.14	554.43	438.75	1 227.00	833.48	602.13	736.34	

*Donde *fa* = factor de área de la cuenca alta; *fb* = factor de área de la cuenca baja y *fc* = factor de área de la cuenca completa del Colorado.

Cuadro 4. Resultados obtenidos por el SPI_{anual} (12 meses).

Año	WY	SPI-12	AR	SPI-12	CO	SPI-12	NM	SPI-12	UT	SPI-12	CA	SPI-12	NV	SPI-12	C-Alta	SPI-12	C-Baja	SPI-12	Colorado	SPI-12
1908	1.6	MH	0.5	N	0.5	N	-0.6	N	0.4	N	-0.6	N	-1.0	N	0.7	N	0.3	N	0.5	N
1909	1.5	MH	0.4	N	1.2	HM	-0.9	N	1.3	HM	1.9	MH	-0.4	N	1.3	HM	0.4	N	0.8	N
1910	0.3	N	-0.4	N	0.3	N	-1.2	SM	0.3	N	0.5	N	-0.5	N	0.1	N	-0.5	N	-0.3	N
1911	-0.3	N	0.2	N	0.2	N	-0.3	N	-0.1	N	1.2	HM	0.3	N	0.0	N	0.2	N	0.1	N
1912	1.1	HM	0.3	N	1.2	HM	0.4	N	-0.5	N	-0.5	N	-1.0	N	0.7	N	0.2	N	0.4	N
1913	1.4	HM	-0.5	N	0.1	N	-0.4	N	-0.3	N	-0.1	N	0.1	N	0.1	N	-0.5	N	-0.3	N
1914	0.3	N	-0.2	N	1.4	HM	0.5	N	0.6	N	2.1	HE	1.5	HM	0.9	N	0.2	N	0.5	N
1915	0.6	N	1.4	HM	1.3	HM	1.6	MH	-0.5	N	1.3	HM	-0.3	N	0.9	N	1.4	HM	1.3	HM
1916	1.3	HM	1.3	HM	0.8	N	0.4	N	0.3	N	1.9	MH	0.4	N	0.9	N	1.3	HM	1.2	HM
1917	0.4	N	0.5	N	0.5	N	-0.7	N	0.1	N	-0.1	N	-0.4	N	0.3	N	0.4	N	0.3	N
1918	0.4	N	-0.2	N	-0.2	N	-1.2	SM	-0.5	N	-0.8	N	-0.5	N	-0.3	N	-0.4	N	-0.4	N
1919	-1.1	SM	0.8	N	0.4	N	1.1	HM	-0.9	N	-0.2	N	-0.3	N	-0.2	N	0.7	N	0.4	N

Cuadro 4 (continuación). Resultados obtenidos por el SPI_{anual} (12 meses).

Año	WY	SPI-12	AR	SPI-12	CO	SPI-12	NM	SPI-12	UT	SPI-12	CA	SPI-12	NV	SPI-12	C-Alta	SPI-12	C-Baja	SPI-12	Colorado	SPI-12
1920	0.2	N	-0.1	N	0.4	N	-0.1	N	0.9	N	0.7	N	0.1	N	0.5	N	-0.1	N	0.2	N
1921	-0.5	N	0.4	N	1.1	HM	0.6	N	0.4	N	0.7	N	-0.2	N	0.6	N	0.5	N	0.5	N
1922	0.3	N	0.0	N	-0.4	N	-1.5	SI	0.3	N	0.9	N	0.4	N	-0.1	N	0.0	N	-0.1	N
1923	2.2	HE	1.0	N	1.9	MH	1.3	HM	-0.1	N	-1.7	SI	0.2	N	1.5	HM	0.9	N	1.2	HM
1924	-0.4	N	-1.5	SI	-0.8	N	-1.4	SM	-1.2	SM	-0.9	N	-1.8	SI	-1.2	SM	-1.7	SI	-1.6	SI
1925	0.8	N	0.0	N	0.3	N	-0.2	N	0.4	N	-0.4	N	0.8	N	0.4	N	0.0	N	0.1	N
1926	0.4	N	1.0	N	0.4	N	0.7	N	-0.6	N	0.9	N	-0.9	N	0.2	N	0.9	N	0.7	N
1927	1.8	MH	0.7	N	1.4	HM	-0.3	N	1.0	N	0.7	N	-0.5	N	1.3	HM	0.6	N	0.9	N
1928	0.2	N	-1.7	SI	0.6	N	-0.1	N	-1.3	SM	-0.7	N	-2.2	SE	-0.3	N	-1.7	SI	-1.2	SM
1929	0.5	N	-0.9	N	0.7	N	0.5	N	-0.1	N	-1.5	SM	-1.5	SI	0.3	N	-0.9	N	-0.4	N
1930	0.4	N	0.7	N	0.5	N	0.1	N	0.7	N	-0.6	N	0.7	N	0.6	N	0.7	N	0.7	N
1931	-1.1	SM	1.8	MH	-1.4	SM	1.6	MH	-1.4	SM	0.0	N	0.1	N	-0.9	N	1.7	MH	0.8	N
1932	-0.1	N	0.1	N	-1.2	SM	0.7	N	-0.1	N	-1.5	SM	-0.4	N	-0.5	N	0.0	N	-0.2	N
1933	-0.6	N	-0.6	N	-0.5	N	-0.2	N	-1.2	SM	-0.6	N	-1.1	SM	-0.9	N	-0.7	N	-0.9	N
1934	-1.1	SM	-1.0	N	-2.7	SE	-1.5	SI	-1.5	SM	-1.1	SM	-0.9	N	-2.2	SE	-1.2	SM	-1.7	SI
1935	-0.8	N	0.7	N	-0.5	N	0.3	N	-1.0	SM	-0.4	N	-0.4	N	-0.7	N	0.6	N	0.1	N
1936	-0.2	N	0.3	N	-0.5	N	-0.2	N	1.1	HM	0.2	N	0.3	N	0.2	N	0.3	N	0.3	N
1937	0.8	N	-0.1	N	-1.2	SM	0.0	N	0.4	N	0.8	N	-0.6	N	-0.2	N	-0.1	N	-0.2	N
1938	0.7	N	-0.1	N	0.8	N	0.0	N	0.7	N	0.9	N	1.1	HM	0.7	N	0.0	N	0.3	N
1939	-1.5	SI	0.3	N	-2.3	SE	-0.3	N	-0.8	N	-1.4	SM	0.2	N	-1.6	SI	0.2	N	-0.6	N
1940	0.4	N	1.2	HM	-0.2	N	0.4	N	1.0	HM	1.5	MH	0.8	N	0.5	N	1.2	HM	1.0	HM
1941	1.9	MH	2.2	HE	2.2	HE	3.7	HE	2.7	HE	1.7	MH	2.2	HE	3.0	HE	2.5	HE	2.9	HE
1942	0.8	N	-1.4	SM	1.2	HM	0.4	N	-0.9	N	0.1	N	-1.0	N	0.3	N	-1.2	SM	-0.6	N
1943	-0.4	N	-0.3	N	-0.7	N	-0.8	N	0.0	N	0.1	N	0.6	N	-0.5	N	-0.3	N	-0.4	N
1944	1.1	HM	0.1	N	0.4	N	0.2	N	0.2	N	0.1	N	-0.2	N	0.5	N	0.1	N	0.2	N
1945	1.6	MH	-0.5	N	0.3	N	-1.6	SI	0.7	N	0.6	N	1.4	HM	0.5	N	-0.4	N	0.0	N
1946	0.9	N	0.2	N	0.6	N	-0.2	N	0.5	N	-1.0	N	0.6	N	0.6	N	0.2	N	0.4	N
1947	1.1	HM	-1.6	SI	0.7	N	-1.1	SM	0.5	N	-1.8	SI	-1.6	SI	0.5	N	-1.7	SI	-0.8	N
1948	-0.2	N	-1.2	SM	-0.4	N	-0.5	N	-0.5	N	-0.5	N	-1.3	SM	-0.6	N	-1.2	SM	-1.1	SM
1949	0.0	N	0.0	N	0.4	N	0.6	N	0.7	N	-1.3	SM	-0.3	N	0.5	N	-0.1	N	0.2	N
1950	0.2	N	-2.1	SE	-1.4	SM	-1.2	SM	-1.2	SM	0.8	N	-0.4	N	-1.4	SM	-1.8	SI	-1.8	SI
1951	0.4	N	0.9	N	0.3	N	-1.4	SM	0.6	N	0.3	N	-0.1	N	0.4	N	0.7	N	0.6	N
1952	-1.3	SM	0.6	N	-1.0	SM	-0.8	N	-0.2	N	0.9	N	0.5	N	-0.8	N	0.5	N	0.0	N
1953	-0.7	N	-1.8	SI	-0.8	N	-1.6	SI	-1.1	SM	-1.0	N	-2.0	SI	-1.3	SM	-2.0	SI	-1.8	SI
1954	-1.7	SI	-0.1	N	-2.0	SI	-0.9	N	-0.6	N	0.0	N	-1.0	N	-1.5	SI	-0.3	N	-0.8	N
1955	0.2	N	-0.2	N	-1.2	SM	-0.9	N	-0.6	N	0.3	N	0.2	N	-0.8	N	-0.2	N	-0.5	N
1956	-1.6	SI	-2.8	SE	-2.1	SE	-3.0	SE	-2.3	SE	-0.8	N	-1.3	SM	-2.7	SE	-2.9	SE	-3.0	SE
1957	0.9	N	0.6	N	1.7	MH	0.9	N	1.5	HM	0.3	N	0.6	N	1.6	MH	0.7	N	1.2	HM
1958	-0.7	N	0.5	N	-0.1	N	1.0	N	-1.1	SM	0.8	N	-0.1	N	-0.4	N	0.5	N	0.2	N
1959	-1.2	SM	0.4	N	0.1	N	-0.2	N	-0.8	N	-1.2	SM	-1.3	SM	-0.5	N	0.1	N	-0.1	N
1960	-2.0	SE	-1.0	SM	-0.7	N	0.3	N	-1.0	SM	-0.2	N	-0.4	N	-1.2	SM	-0.9	N	-1.1	SM
1961	-0.7	N	-0.5	N	0.6	N	0.1	N	-0.1	N	-1.2	SM	-0.7	N	0.0	N	-0.6	N	-0.4	N
1962	0.3	N	-0.9	N	-1.0	N	-0.4	N	-0.9	N	0.2	N	-0.4	N	-0.9	N	-0.9	N	-1.0	N
1963	0.2	N	-0.2	N	-0.8	N	-0.8	N	-0.2	N	0.4	N	0.8	N	-0.5	N	-0.2	N	-0.3	N
1964	0.1	N	-0.5	N	-1.1	SM	-1.2	SM	-0.2	N	0.1	N	-0.3	N	-0.7	N	-0.6	N	-0.7	N
1965	0.1	N	1.9	MH	1.6	MH	0.7	N	1.5	HM	0.1	N	1.5	HM	1.5	MH	1.8	MH	1.9	MH
1966	-1.4	SM	-0.4	N	-1.2	SM	-0.7	N	-1.1	SM	-0.6	N	-1.4	SM	-1.4	SM	-0.6	N	-1.0	N
1967	1.1	HM	0.6	N	0.5	N	-0.2	N	0.4	N	0.4	N	0.7	N	0.6	N	0.6	N	0.6	N
1968	0.2	N	-0.7	N	-1.0	N	-0.4	N	0.1	N	-0.3	N	0.0	N	-0.5	N	-0.7	N	-0.7	N
1969	-0.9	N	0.1	N	1.3	HM	1.0	N	0.6	N	1.3	HM	1.5	HM	0.8	N	0.3	N	0.5	N
1970	0.1	N	-0.4	N	-0.4	N	-1.2	SM	0.1	N	0.5	N	0.4	N	-0.3	N	-0.4	N	-0.4	N
1971	0.9	N	-0.3	N	-0.4	N	0.0	N	0.3	N	-0.7	N	0.4	N	0.1	N	-0.3	N	-0.2	N
1972	0.3	N	0.4	N	-0.1	N	1.1	HM	-0.1	N	-0.9	N	-0.4	N	0.1	N	0.3	N	0.3	N
1973	0.7	N	-0.5	N	0.3	N	-0.5	N	0.4	N	1.0	HM	0.4	N	0.3	N	-0.4	N	-0.1	N

Cuadro 4 (continuación). Resultados obtenidos por el SPI_{anual} (12 meses).

Año	WY	SPI-12	AR	SPI-12	CO	SPI-12	NM	SPI-12	UT	SPI-12	CA	SPI-12	NV	SPI-12	C-Alta	SPI-12	C-Baja	SPI-12	Colorado	SPI-12
1974	-1.5	SI	-0.5	N	-1.4	SM	0.4	N	-1.4	SM	-0.2	N	-0.6	N	-1.5	SM	-0.5	N	-1.0	N
1975	0.2	N	-0.8	N	-0.5	N	-0.2	N	0.2	N	-0.2	N	0.5	N	-0.2	N	-0.7	N	-0.5	N
1976	-0.5	N	0.1	N	-1.2	SM	-0.9	N	-1.9	SI	-2.1	SE	0.4	N	-1.4	SM	-0.2	N	-0.7	N
1977	-0.1	N	-0.6	N	-0.8	N	-0.2	N	-0.8	N	-0.8	N	0.0	N	-0.8	N	-0.6	N	-0.8	N
1978	0.8	N	2.5	HE	-0.5	N	0.9	N	1.4	HM	0.9	N	2.0	MH	0.9	N	2.4	HE	2.0	HE
1979	-1.5	SM	0.1	N	0.7	N	0.3	N	-0.7	N	0.4	N	0.3	N	-0.2	N	0.1	N	0.0	N
1980	-0.1	N	0.6	N	-0.2	N	-0.6	N	1.6	MH	0.4	N	1.5	HM	0.5	N	0.6	N	0.6	N
1981	-0.1	N	-0.1	N	0.3	N	0.5	N	0.8	N	0.7	N	0.5	N	0.4	N	0.1	N	0.2	N
1982	1.5	HM	1.3	HM	0.6	N	0.4	N	1.8	MH	1.6	MH	1.9	MH	1.4	HM	1.4	HM	1.5	MH
1983	0.6	N	2.0	HE	0.8	N	0.3	N	2.6	HE	2.8	HE	2.9	HE	1.7	MH	2.2	HE	2.2	HE
1984	-0.3	N	1.2	HM	0.7	N	1.2	HM	0.9	N	-0.7	N	1.2	HM	0.8	N	1.2	HM	1.1	HM
1985	-1.0	N	0.5	N	0.5	N	1.2	HM	0.4	N	-1.2	SM	-0.4	N	0.4	N	0.5	N	0.5	N
1986	0.6	N	0.4	N	0.4	N	2.2	HE	0.8	N	0.5	N	-0.2	N	0.9	N	0.6	N	0.8	N
1987	-0.4	N	0.2	N	0.5	N	0.5	N	0.5	N	-0.5	N	1.1	HM	0.4	N	0.3	N	0.3	N
1988	-2.2	SE	0.1	N	-0.3	N	1.0	N	-0.9	N	-1.0	SM	-0.4	N	-0.8	N	0.0	N	-0.3	N
1989	-0.4	N	-1.7	SI	-0.9	N	-1.0	N	-2.0	SI	-1.2	SM	-1.0	SM	-1.5	SM	-1.7	SI	-1.8	SI
1990	-0.5	N	0.5	N	1.0	N	0.9	N	-0.5	N	-1.5	SM	-0.3	N	0.3	N	0.4	N	0.3	N
1991	0.3	N	0.4	N	0.6	N	1.5	MH	0.1	N	-0.3	N	0.0	N	0.5	N	0.4	N	0.5	N
1992	-0.4	N	2.0	MH	0.4	N	0.8	N	0.1	N	0.2	N	0.4	N	0.4	N	1.8	MH	1.4	HM
1993	1.2	HM	1.7	MH	0.5	N	0.3	N	1.2	HM	0.8	N	0.4	N	1.1	HM	1.6	MH	1.5	MH
1994	-0.8	N	0.1	N	-0.3	N	0.5	N	0.2	N	-0.8	N	-0.3	N	-0.1	N	0.0	N	-0.1	N
1995	1.4	HM	-0.3	N	1.2	HM	-0.6	N	1.1	HM	1.8	MH	1.4	HM	1.1	HM	0.0	N	0.5	N
1996	0.2	N	-1.4	SM	0.4	N	0.2	N	0.5	N	1.6	MH	0.7	N	0.3	N	-0.9	N	-0.5	N
1997	1.1	HM	0.0	N	1.5	HM	1.7	MH	1.3	HM	-0.2	N	0.1	N	1.6	MH	0.2	N	0.8	N
1998	1.4	HM	0.7	N	0.4	N	0.2	N	1.7	MH	2.0	MH	2.5	HE	1.2	HM	0.9	N	1.1	HM
1999	0.0	N	-0.7	N	1.0	N	0.4	N	-0.4	N	-0.8	N	-0.9	N	0.2	N	-0.7	N	-0.3	N
2000	-0.8	N	-0.2	N	-0.4	N	0.1	N	0.2	N	-0.1	N	0.1	N	-0.3	N	-0.2	N	-0.3	N
2001	-1.6	SI	-0.4	N	-0.1	N	-0.6	N	-0.6	N	0.1	N	-0.6	N	-0.7	N	-0.5	N	-0.6	N
2002	-1.6	SI	-2.4	SE	-2.6	SE	-0.4	N	-1.9	SI	-0.5	N	-2.0	SE	-2.4	SE	-2.3	SE	-2.5	SE
2003	-0.6	N	-0.5	N	-0.6	N	-1.7	SI	-0.5	N	-0.2	N	-0.1	N	-0.8	N	-0.6	N	-0.8	N
2004	-0.7	N	0.7	N	0.4	N	1.3	HM	0.9	N	-0.1	N	1.0	HM	0.6	N	0.8	N	0.7	N
2005	0.5	N	0.6	N	0.0	N	0.4	N	1.5	MH	1.1	HM	1.9	MH	0.8	N	0.8	N	0.9	N
2006	-1.4	SM	-1.0	N	0.3	N	1.1	HM	0.5	N	0.3	N	0.0	N	0.1	N	-0.7	N	-0.4	N
2007	-0.3	N	-0.4	N	0.3	N	0.4	N	-0.7	N	-1.7	SI	-1.0	SM	-0.2	N	-0.5	N	-0.4	N
2008	0.1	N	0.4	N	-0.4	N	0.1	N	-0.5	N	-0.8	N	-0.9	N	-0.3	N	0.3	N	0.0	N
2009	0.3	N	-1.8	SI	0.7	N	-0.5	N	-0.5	N	-0.8	N	-0.4	N	0.0	N	-1.7	SI	-1.1	SM
2010	-2.5	SE	-1.3	SM	-2.8	SE	-1.9	SI	-2.6	SE	-1.2	SM	-1.9	SI	-3.1	SE	-1.6	SI	-2.4	SE

228.74 mm (valor respectivo de precipitación para SPI = -2).

También con los datos de los cuadros 3 y 4 se graficaron los valores de precipitación y del SPI₁₂ (figuras 4 y 5) para la cuenca alta.

En las figuras 4 y 5 se nota que en la cuenca alta del río Colorado, al igual que en toda la cuenca, en tres años se han presentado sequías extremas (1956, 2002 y 2010) que han estado por debajo del umbral, donde el SPI < -2 o menor a 254.67 mm (valor respectivo de precipitación para SPI = -2 en la cuenca alta).

En comparación con la cuenca completa (años con sequía extrema: 1956, 2002 y 2010), los tres años coinciden en este fenómeno.

Asimismo, con los datos de los cuadros 3 y 4 se graficaron los valores de precipitación y del SPI₁₂ para la cuenca baja (ver figuras 6 y 7).

Como se observa en las figuras 6 y 7, en la cuenca baja del río Colorado, en dos años se han presentado sequías extremas (1956 y 2002), donde el SPI < -2 o menor a 193.42 mm (valor respectivo de precipitación para SPI = -2). En comparación con la cuenca completa (años con

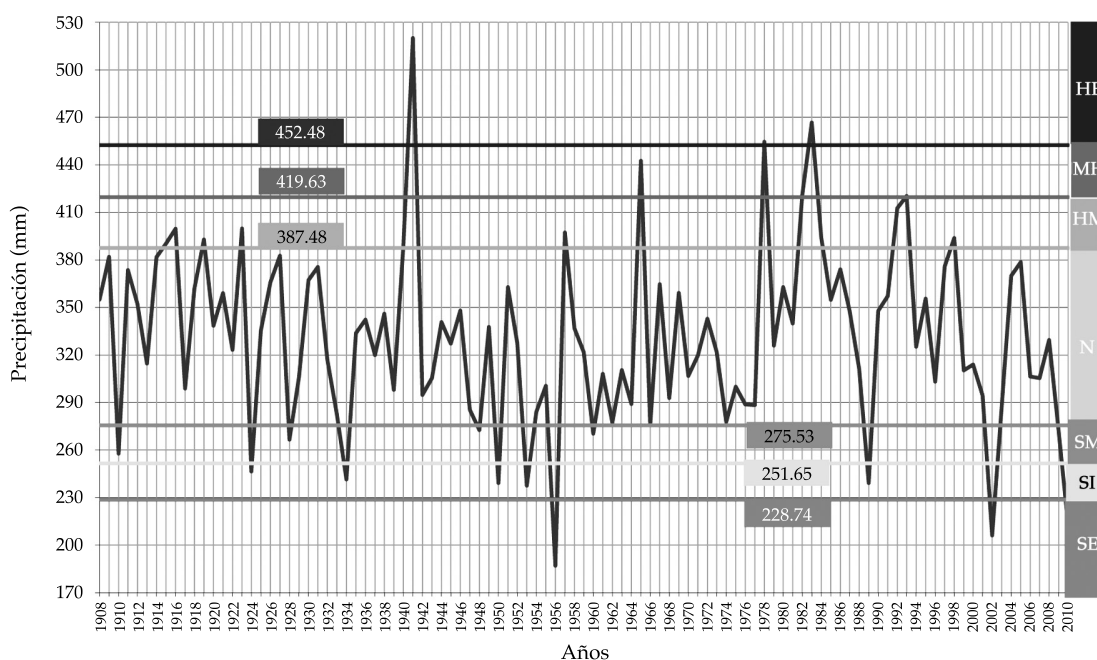


Figura 2. Valores de precipitación correspondientes al SPI_{anual} para toda la cuenca del río Colorado.

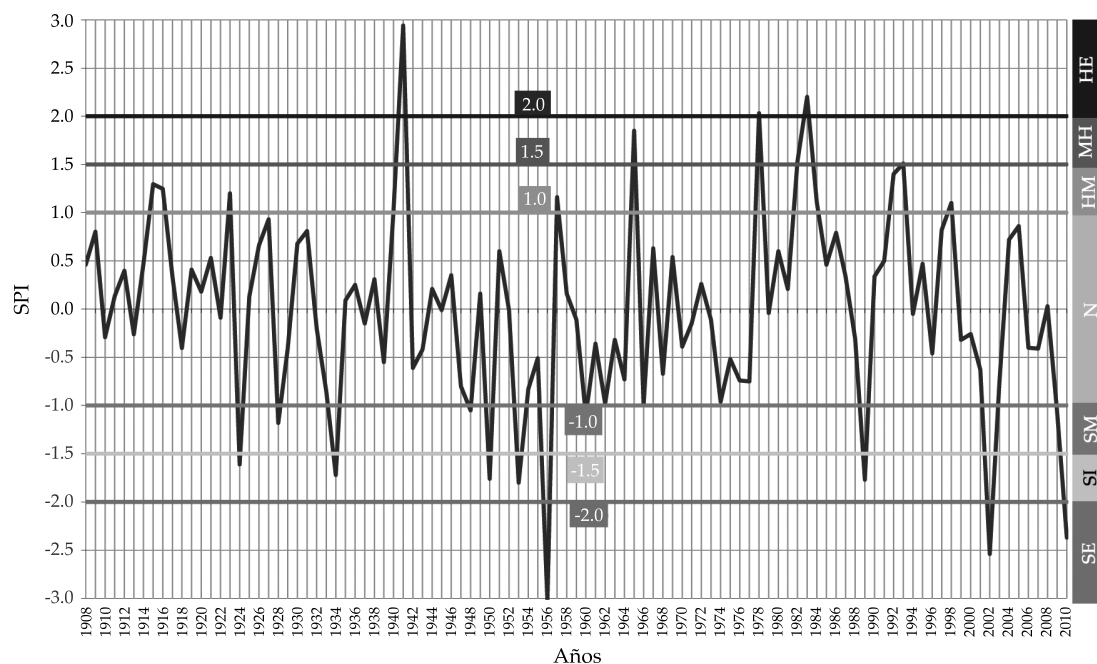


Figura 3. Valores del SPI_{anual} para toda la cuenca del río Colorado.

sequía extrema: 1956, 2002 y 2010), dos años coinciden con este fenómeno. Al observar la tendencia que muestra el comportamiento de las precipitaciones en la cuenca alta y en la

baja, esta última tiene mejor correlación con la cuenca completa, por lo que se deduce que lo que ocurrió en la cuenca baja se reflejó en toda la cuenca (véase la figura 8, en donde

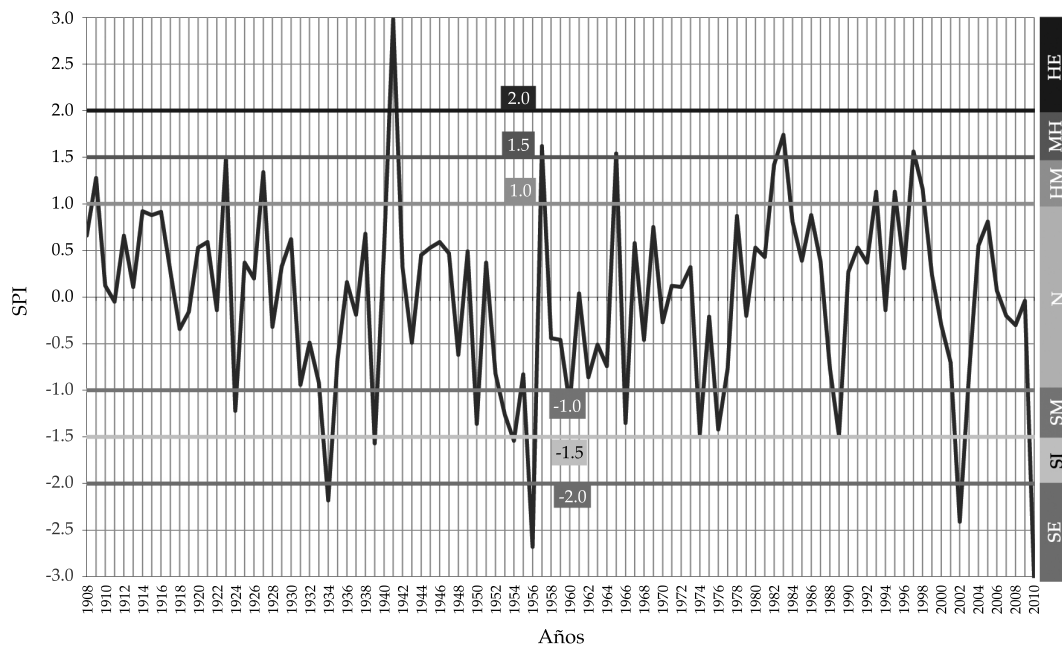


Figura 4. Valores de precipitación correspondientes al SPI_{anual} para la cuenca alta del río Colorado.

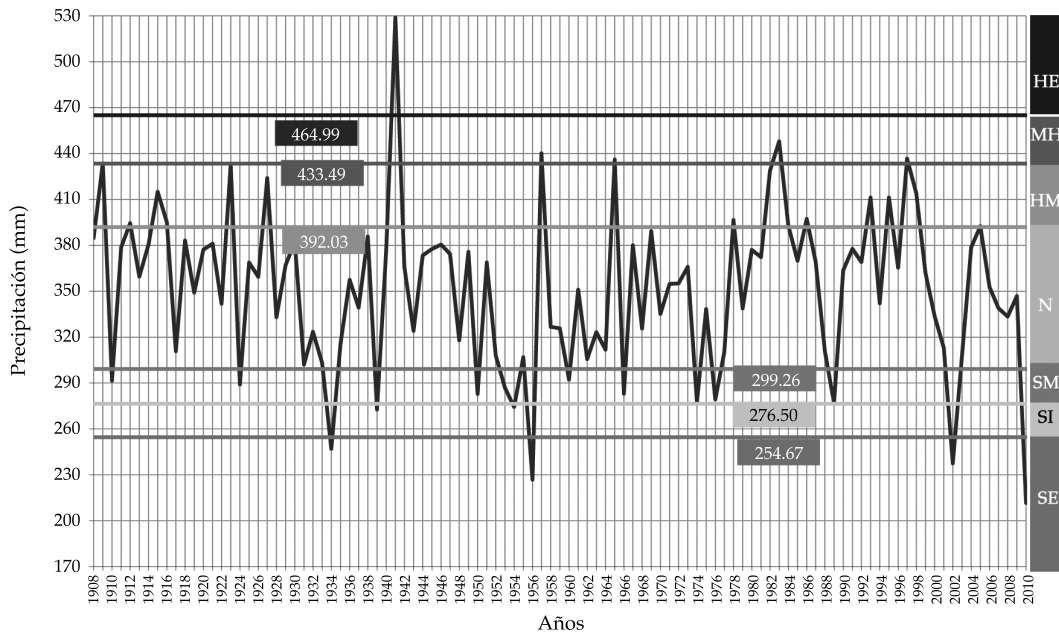


Figura 5. Valores del SPI_{anual} para la cuenca alta del río Colorado.

se superponen los valores del SPI_{12} para las cuencas completa, alta y baja del río Colorado).

En los años 1956, 2002 y 2010, clasificados como sequías extremas, Estados Unidos cum-

plió con la entrega de agua a México comprometida en el Tratado de 1944. Esto se puede explicar porque su sistema hidráulico tiene la capacidad de amortiguar dichas sequías para

un cierto periodo de años, manteniendo niveles adecuados de almacenamiento, o por el efecto de mayor escurrimiento por el deshielo.

Análisis de escurrimientos

Con los escurrimientos restituidos a nivel mensual para los años comprendidos entre 1906 y 2007 (102 años, datos del USBR), se calcularon los SDI anuales para el río Colorado (ver cuadro 5).

Con los datos del cuadro 5 se graficaron los valores de escurrimiento y del SDI_{anual} (ver las figuras 9 y 10).

Como se observa en las figuras 9 y 10, en la cuenca completa del río Colorado, para todo el periodo de análisis, en sólo tres años se han presentado sequías extremas (1934, 1977 y 2002), ya que han estado por debajo del umbral, es decir para un SDI < -2 o menor a 10 855.35 hm³ (valor respectivo de escurrimiento para SDI = -2). El hecho de que no coincidan estos años con los de las precipitaciones puede deberse, entre otras causas, al efecto de la capacidad de regulación del sistema

hidráulico y al impacto del deshielo sobre el escurrimiento.

De la misma forma que con las precipitaciones, se obtuvo el porcentaje correspondiente para las cuencas alta y baja del río Colorado, tomando como punto de referencia Lee's Ferry y sus respectivos valores de SDI (ver cuadros 6 y 7).

De los datos del cuadro 6, cuenca alta, se graficaron los escurrimientos anuales y el SDI_{anual} (ver figuras 11 y 12).

Como se observa en las figuras 11 y 12, en la cuenca alta del río Colorado, en tres años se han presentado sequías extremas: 1934, 1977 y 2002, que han estado por debajo del umbral SDI < -2 o menor a 9 803.0 hm³ (valor respectivo de escurrimiento para SDI = -2). En comparación con la cuenca completa (1934, 1977 y 2002), los tres años en que se presenta sequía extrema coinciden.

Asimismo, para la cuenca baja, con los datos del cuadro 8 se graficaron los escurrimientos anuales y el SDI_{anual} (ver figuras 13 y 14).

Como se observa en las figuras 13 y 14, en la cuenca baja del río Colorado, en cuatro años se

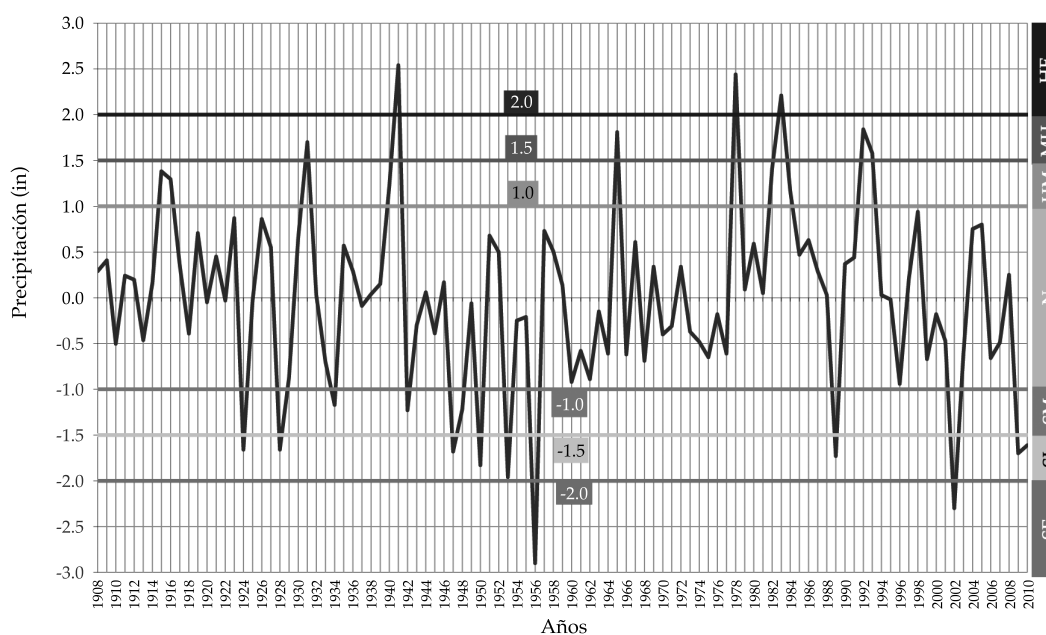


Figura 6. Valores de precipitación correspondientes al SPI_{anual} para la cuenca alta del río Colorado.

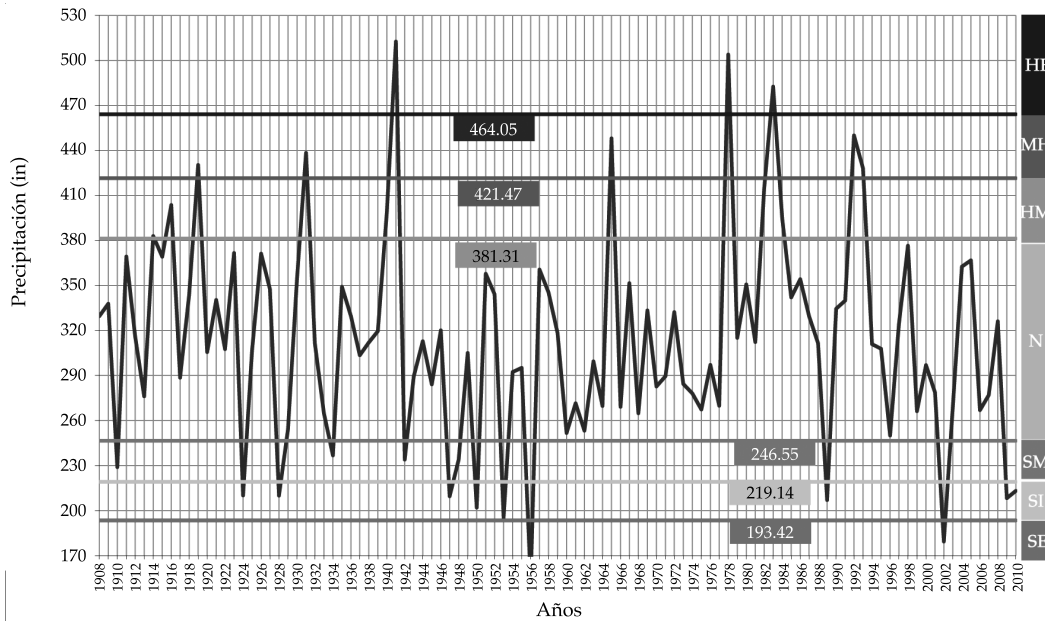


Figura 7. Valores del SPI_{anual} para la cuenca alta del río Colorado.

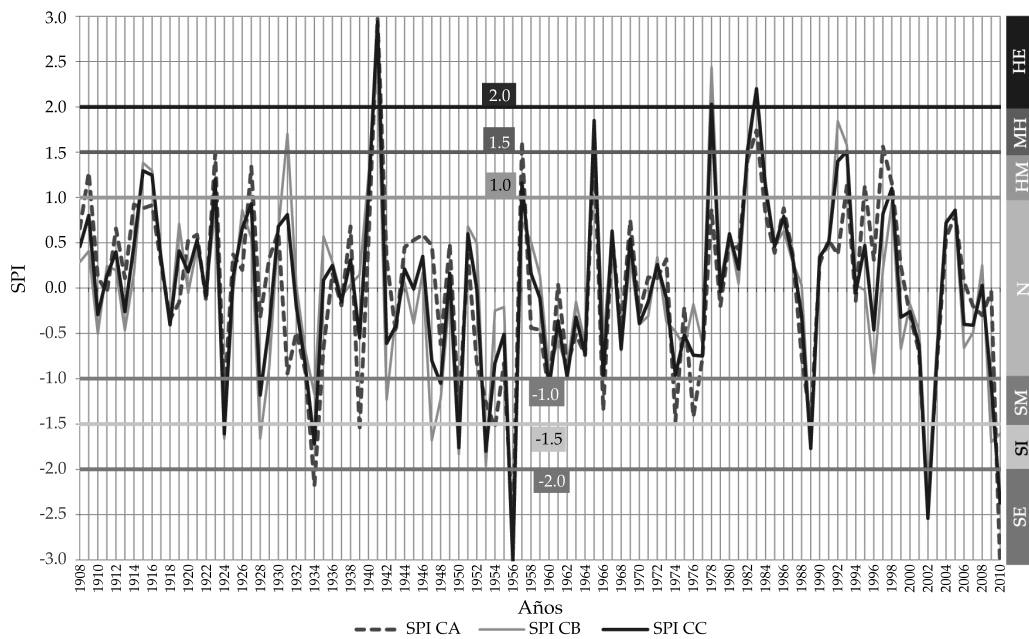


Figura 8. Valores anuales del SPI_{12} en las cuencas alta, baja y completa del río Colorado.

han presentado sequías extremas (1928, 1929, 1935 y 1936), que han estado por debajo del umbral $SDI < -2$ o menor a 724.98 hm^3 (valor respectivo de escurrimiento para $SDI = -2$).

Todos ellos antes de la firma del Tratado de 1944.

En comparación con la cuenca completa (1934, 1977 y 2002), ningún año coincide con

Cuadro 5 (continuación. Escurreimientos restituidos y cálculo del SDI_{anual} para la cuenca completa del río Colorado.

2003	415.63	443.52	624.55	914.05	2 672.83	3 744.92	1 683.10	991.60	991.53	573.17	634.05	501.12	14 190.06	9.56	-1.03
2004	376.61	483.00	877.98	1 400.71	2 517.03	2 274.22	1 501.62	774.53	804.57	1 040.36	932.10	657.25	13 639.98	9.52	-1.17
2005	1 391.43	1 234.29	1 225.49	2 216.40	5 130.86	5 606.16	2 779.98	1 336.83	784.23	1 039.62	726.49	577.41	24 049.18	10.09	0.74
2006	510.36	439.88	733.10	1 766.81	3 809.06	3 206.79	1 633.31	1 155.70	800.99	1 632.50	835.33	574.19	17 098.02	9.75	-0.41
2007	518.95	569.90	1 252.94	1 405.65	3 086.60	2 670.14	1 420.86	1 210.90	726.58	838.43	661.60	673.86	15 036.40	9.62	-0.84
Mín	236.41	267.09	312.85	521.57	876.61	1 209.40	945.16	680.71	405.62	226.71	251.24	329.08	7 817.91	8.96	-3.04
Promedio	514.79	610.00	932.06	1 618.19	3 835.19	5 079.55	2 905.09	1 541.10	1 001.96	853.76	670.33	564.45	20 126.47	9.87	0.00
Desvest	184.27	221.58	344.69	644.31	1 423.87	1 950.81	1 285.49	576.02	399.49	374.41	199.58	145.17	5 676.43	0.30	1.00
	236.41	267.09	312.85	521.57	876.61	1 209.40	945.16	680.71	405.62	226.71	251.24	329.08	7 817.91	8.96	-3.04

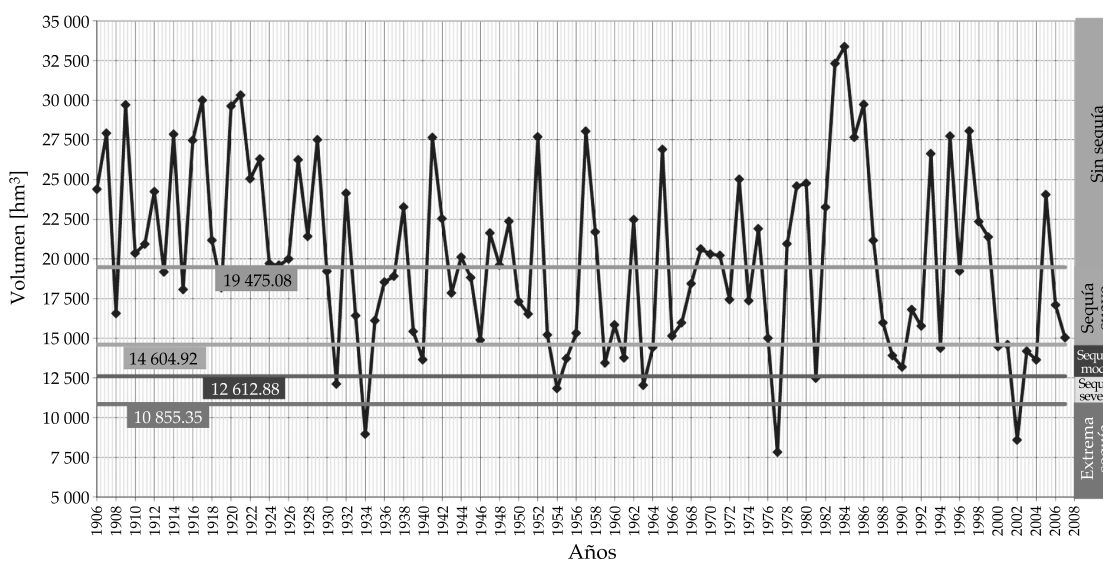


Figura 9. Valores de escurrimento anual para toda la cuenca del río Colorado.

sequía extrema. Por otro lado, la cuenca alta coincide con los tres años de la cuenca completa. Así, en lo que se refiere a escurrimientos, lo que ocurrió en la cuenca alta se reflejó de igual manera en toda la cuenca.

Para escurrimientos, en toda la cuenca en tres años se ha presentado sequía extrema (1934, 1977 y 2002), al igual que las precipitaciones (1950, 1956 y 1989), pero no coinciden en los mismos años, esto se debe en gran medida a la operación del sistema (véase la figura 15, en donde se superponen los valores del SDI_{anual} para la cuenca completa, alta y baja del río Colorado, y al efecto del deshielo).

Cuenca del río Bravo

En este caso sólo se analizaron los escurrimientos y el SDI debido a que únicamente se cuenta con la información mexicana. Este análisis es relevante, pues el sentido del presente artículo se enmarca en el Tratado sobre Aguas Internacionales de 1944, en el cual se menciona que en caso de extraordinaria sequía o de serio accidente en los sistemas hidráulicos de los afluentes mexicanos aforados, que hagan difícil para México dejar escurrir los 431 721 000 metros cúbicos (350 000 acres pies) anuales que se asignan a los Estados Unidos, como aportación

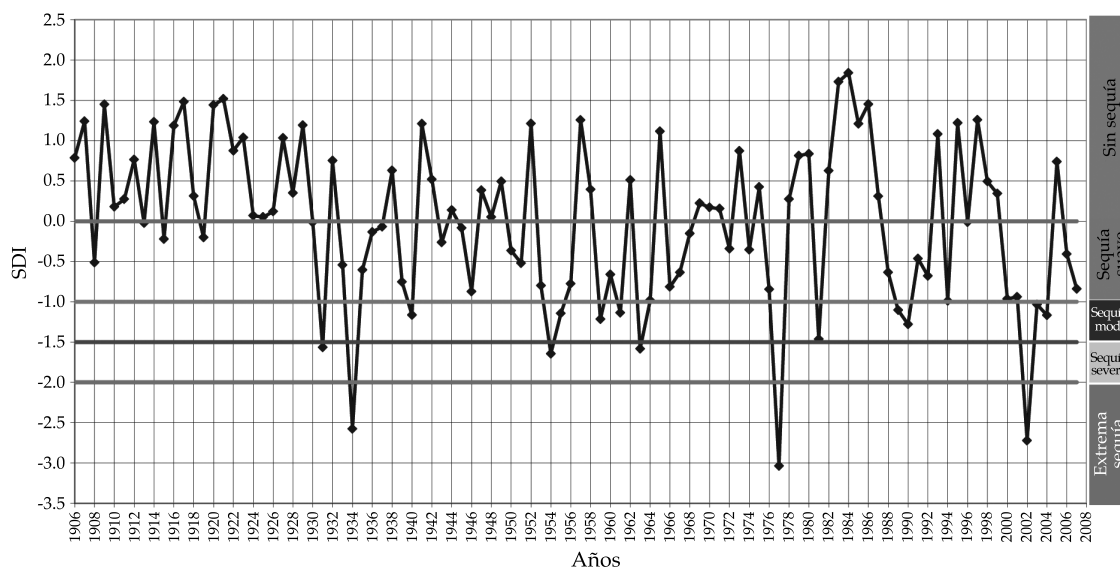


Figura 10. Valores de SDI_{anual} para toda la cuenca del río Colorado.

mínima de los seis afluentes mexicanos: río Conchos, San Diego, San Rodrigo, Escondido, Salado y Arroyo Las Vacas, los faltantes que existieren al final del ciclo aludido de cinco años se repondrían en el ciclo siguiente con agua procedente de los mismos. Por ello es necesario enfocarse en los escurrimientos naturales de los afluentes mencionados, para determinar las condiciones de escasez o abundancia bajo diversos escenarios que pudieran presentarse en los mismos.

Análisis de escurrimientos

Para esta cuenca (ver figura 16) se utilizaron los escurrimientos restituidos para los seis afluentes en el periodo 1950-2004, 55 años, y 1900 a 1943, 44 años (registro aproximado al que se usó para la firma del Tratado de 1944), reconstruidos a partir del informe del ingeniero Orive-Alba (véase figura 17).

El SDI se calculó con los escurrimientos mensuales para el periodo 1900-1943 para los seis afluentes sujetos a entregas de agua de México a Estados Unidos conforme al Tratado de 1944: ríos Conchos, San Diego,

San Rodrigo, Escondido, Salado, y arroyo Las Vacas. El comportamiento de la sequía se analizó a través de periodos de referencia k , cuyo inicio y final coinciden con el ciclo agrícola, es decir $k_{1-3 \text{ meses}}$ (octubre-diciembre), $k_{2-6 \text{ meses}}$ (octubre-marzo), $k_{3-9 \text{ meses}}$ (octubre-junio) y $k_{4-12 \text{ meses}}$ (octubre-septiembre), véase la figura 18.

Como se observa en la figura 18, de los seis afluentes, sólo en el río Conchos en todos los periodos de referencia se ha presentado por lo menos un año con sequía extrema, es decir para un $SDI \leq -2$.

Aplicando el SDI a la suma total de los escurrimientos vírgenes de los ríos: Conchos, San Diego, San Rodrigo, Escondido, Salado, y arroyo Las Vacas (ver figura 19), se observa que para el periodo k_3 (octubre-junio) se presentó sequía extrema en el año 1901-1902, es decir para un $SDI \leq -2$. En tanto que para el periodo k_4 (anual) se presentó sequía severa en 1916-1917, 1921-1922, para un SDI entre -1.5 y -2.0.

Para los datos anuales de escurrimiento del periodo 1950-2004, con el escurrimiento virgen total para los seis afluentes del río Bravo, el promedio en el periodo 1950-2004 es mayor

Cuadro 7 (continuación). Valores de escurrimientos restituídos mensuales y sus correspondientes valores de SDI para la cuenca baja del Colorado.

1994	93.73	61.45	103.84	39.12	139.82	52.70	121.15	139.03	182.20	139.03	43.57	191.16	1 306.80	7.18	-0.37	7.33	0.06
1995	261.82	255.60	468.84	121.48	255.71	169.19	207.88	179.99	157.81	140.54	177.49	144.29	2 540.65	7.84	1.35	7.34	0.10
1996	80.49	39.11	-106.36	139.54	128.92	77.54	209.70	190.76	139.41	133.95	166.18	41.90	1 241.13	7.12	-0.50	7.17	-0.63
1997	-14.22	-3.10	120.41	95.19	87.40	54.42	129.12	235.35	250.95	106.89	147.11	15.36	1 224.89	7.11	-0.53	7.18	-0.59
1998	-47.32	143.47	169.48	274.32	236.06	148.28	227.28	188.50	168.68	135.42	37.60	-56.04	1 625.74	7.39	0.20	7.12	-0.84
1999	192.19	61.49	27.41	-23.90	75.55	83.95	265.39	215.27	160.55	85.50	105.64	122.38	1 371.42	7.22	-0.24	7.05	-1.12
2000	99.57	83.35	51.75	-25.03	98.90	122.00	66.79	184.62	109.57	135.87	70.55	89.61	1 087.55	6.99	-0.84	7.07	-1.04
2001	142.26	113.98	68.40	32.32	104.50	76.62	77.07	231.60	173.76	106.01	80.05	91.85	1 298.42	7.17	-0.38	7.28	-0.13
2002	34.79	8.60	-35.81	-15.62	63.01	40.51	100.61	133.50	267.24	148.88	86.15	77.89	909.77	6.81	-1.30	7.24	-0.31
2003	80.02	110.14	-2.07	78.80	104.53	45.07	114.39	219.41	149.30	81.54	126.72	70.26	1 178.11	7.07	-0.63	7.29	-0.09
2004	17.14	98.83	-20.01	120.06	92.65	28.65	123.14	152.82	218.30	273.76	227.26	173.51	1 506.12	7.32	0.00		
2005	678.67	580.15	382.23	258.23	298.89	116.42	160.51	240.55	160.93	147.35	49.43	65.91	3 139.25	8.05	1.90		
2006	6.94	11.08	119.37	68.33	68.60	41.94	95.29	182.75	104.68	211.82	84.78	50.72	1 046.29	6.95	-0.94		
2007	20.91	19.10	61.14	54.86	138.35	44.77	144.21	226.39	124.89	99.72	116.82	129.61	1 180.78	7.07	-0.63		
MIN	-160.54	-98.30	-178.02	-297.07	-576.72	-234.05	31.25	23.48	-41.20	-92.10	-99.07	-94.33	475.87	6.17	-2.98	6.72	-2.56
Promedio	77.74	123.90	129.07	128.16	87.43	137.31	237.51	219.76	182.01	129.92	74.24	89.09	1 616.15	7.32	0.00	7.31	0.00
Desvest	132.93	148.26	158.63	114.78	147.79	131.92	128.39	116.36	120.72	96.46	74.07	83.62	611.69	0.39	1.00	0.23	1.00
	806.38	758.68	770.40	476.14	553.70	711.01	635.54	610.72	1 016.06	531.84	236.27	392.55	3 909.70	8.27	2.47	7.81	2.12

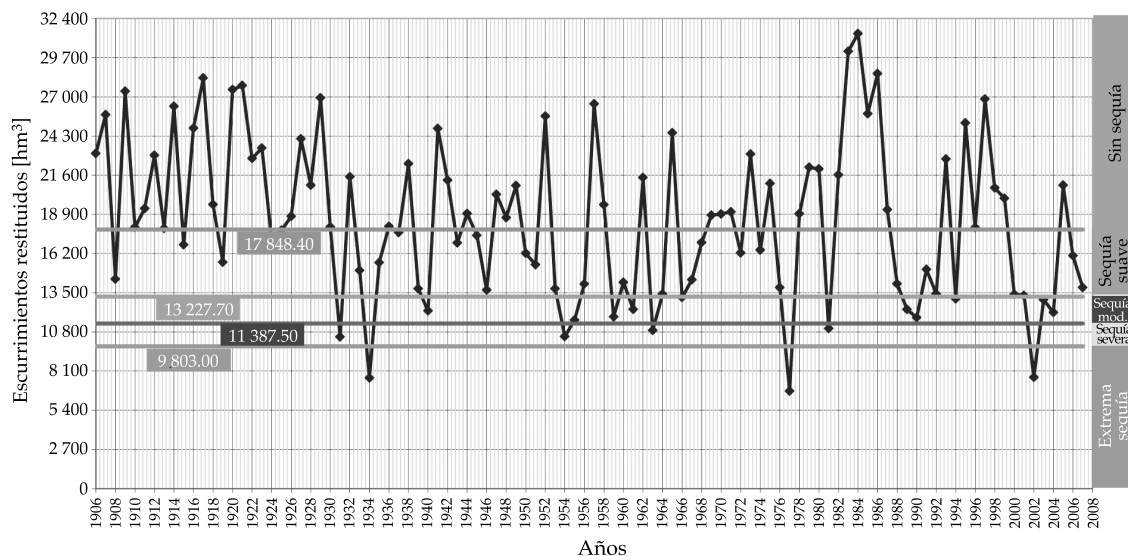


Figura 11. Valores de escurrimiento correspondientes del SDI_{anual} para la cuenca alta del río Colorado.

que en 1900-1943, esto es 3 506 hm³ y 3 206 hm³, respectivamente. Asimismo, el escurrimiento mínimo ha sido de 1 593 hm³ y 1 019 hm³, años 1901 y 1956, respectivamente.

En promedio, los volúmenes de aportación por afluente para el periodo 1900-1943 es del orden de 1 853.20 hm³ para el río Conchos;

72.06 hm³ para el Escondido; 887.38 hm³ para el Salado, y 350.16 hm³ para los tres afluentes agrupados: arroyo Las Vacas, San Rodrigo y San Diego.

Al realizar un análisis para determinar cuál es el afluente de mayor influencia de acuerdo con el SDI, se establecieron cuatro escenarios:

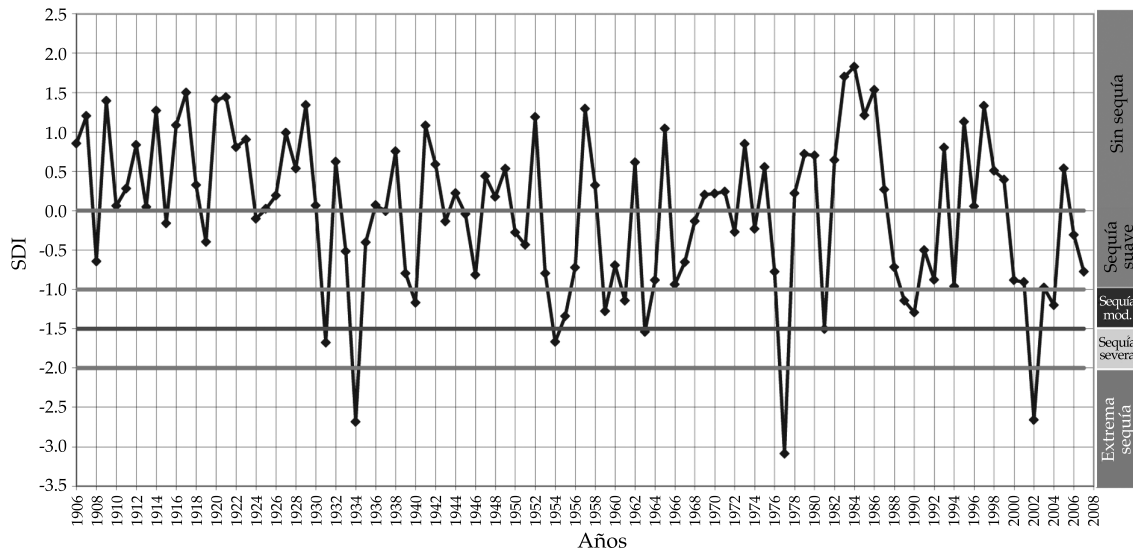


Figura 12. Valores de SDI_{anual} para la cuenca alta del río Colorado.

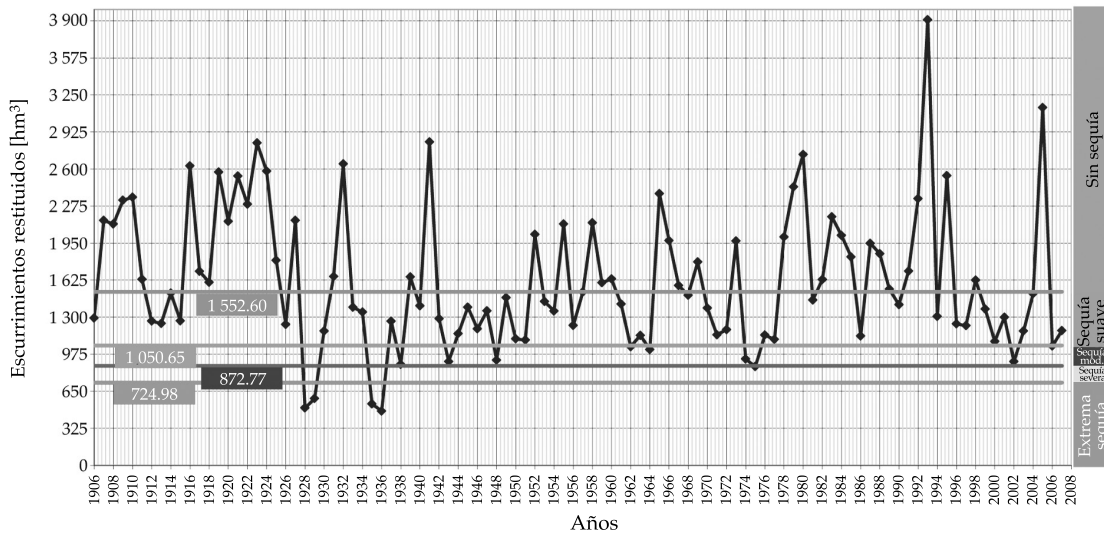


Figura 13. Valores de escurrimiento correspondientes del SDI_{anual} para la cuenca baja del río Colorado.

a) sin la existencia de la aportación de los tres afluentes agrupados, arroyo Las Vacas, y ríos San Diego y San Rodrigo; b) sin la aportación del río Escondido; c) sin la aportación del río Conchos, y d) sin la aportación del río Salado. Los resultados de estos escenarios, haciendo énfasis sólo cuando se presenta una sequía, de

ligera a extrema, se presenta en los cuadros 8 a 11.

De los resultados obtenidos se deduce que el umbral de extrema sequía es rebasado cuatro veces en el escenario cuando no se considera el río Salado (d), mientras que en los demás sólo se rebasa una vez. Pero si se toma en cuenta

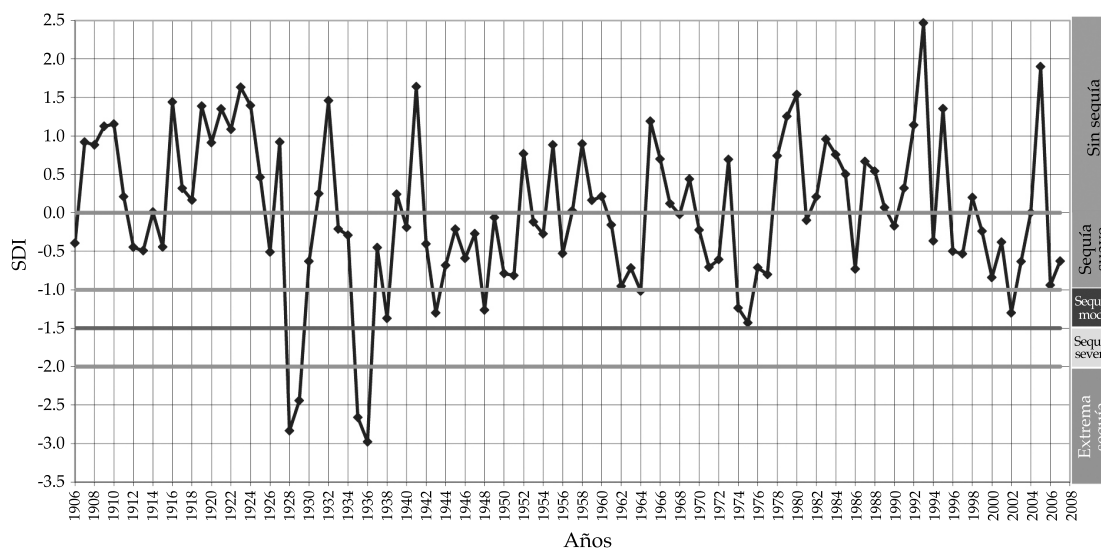


Figura 14. Valores de SDI_{anual} para la cuenca baja del río Colorado.

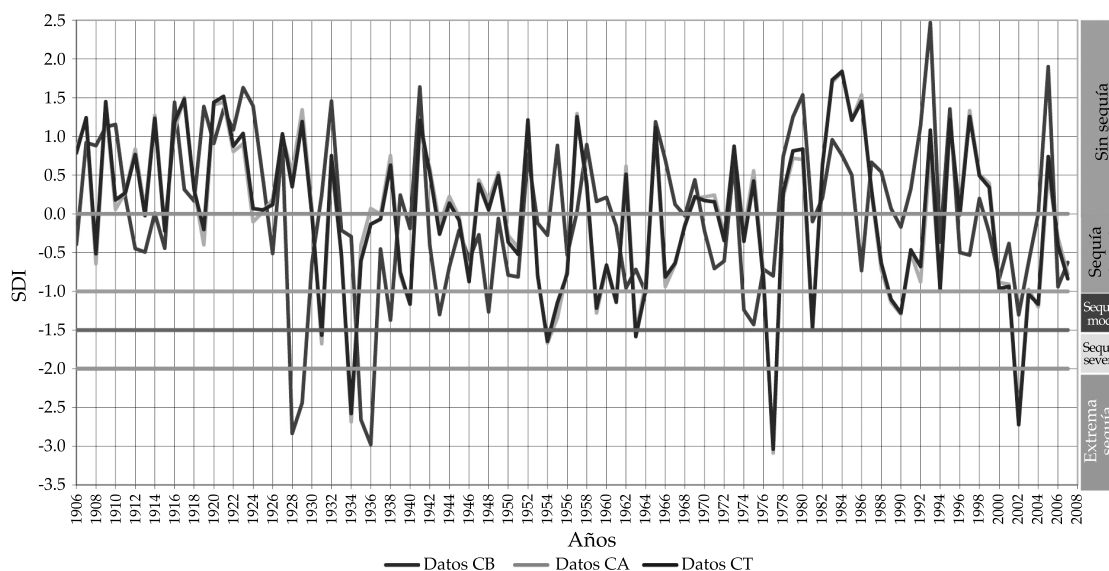


Figura 15. Comparación de valores de SDI_{anual} para la cuenca completa, alta y baja del río Colorado.

el total de veces en los cuales se presenta una sequía, de ligera a extrema, el escenario en el cual no se considera el río Conchos (c) es donde la cantidad de coincidencias es mayor; esto se debe a que el Conchos es el afluente de mayor aporte en el sistema.

De lo anterior se concluye que el afluente que tiene mayor impacto para una sequía extrema es el río Salado, derivado de los resultados obtenidos en el escenario (c); en tanto que el afluente que tiene mayor influencia para que se presente una sequía de

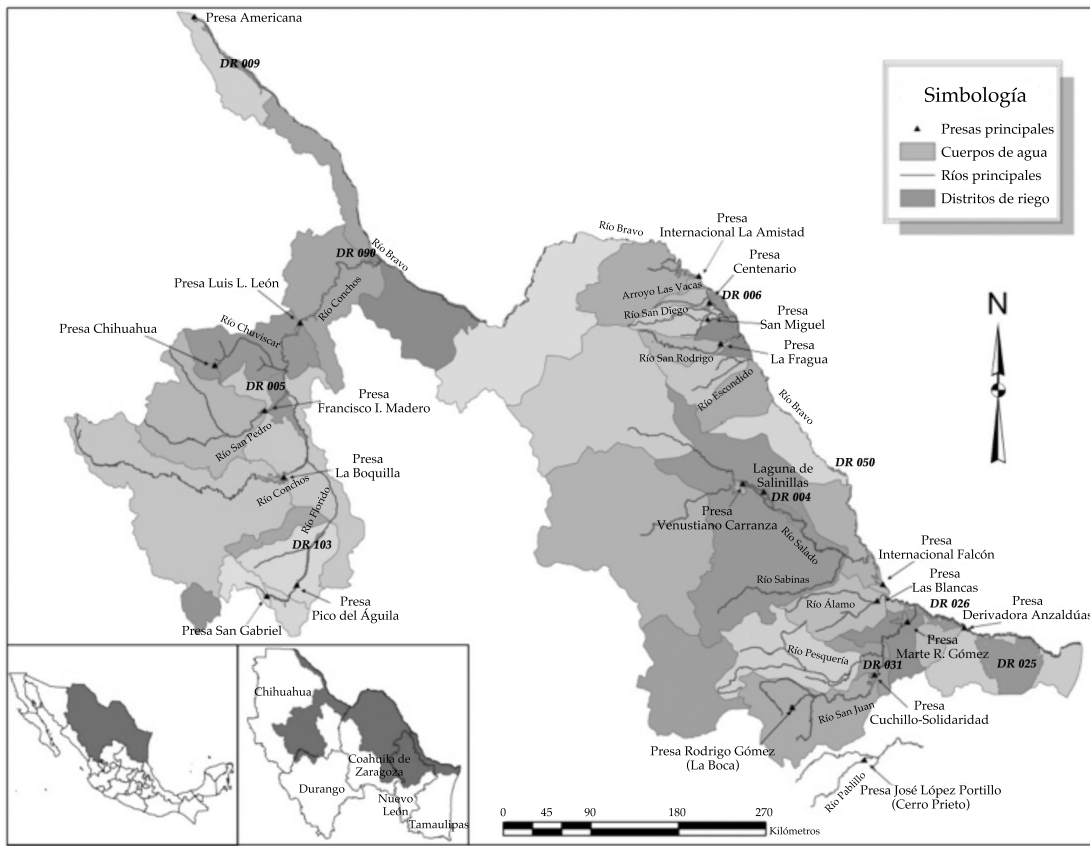


Figura 16. Cuenca del río Bravo.

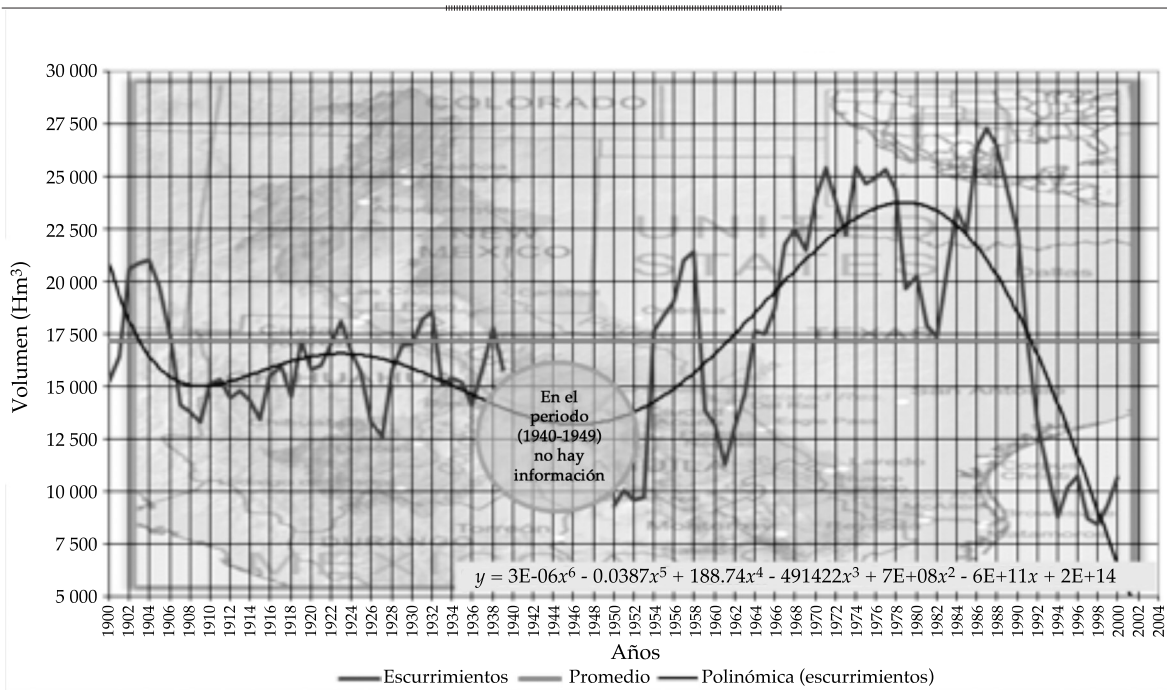


Figura 17. Escurreimientos restituidos para la cuenca del río Bravo.

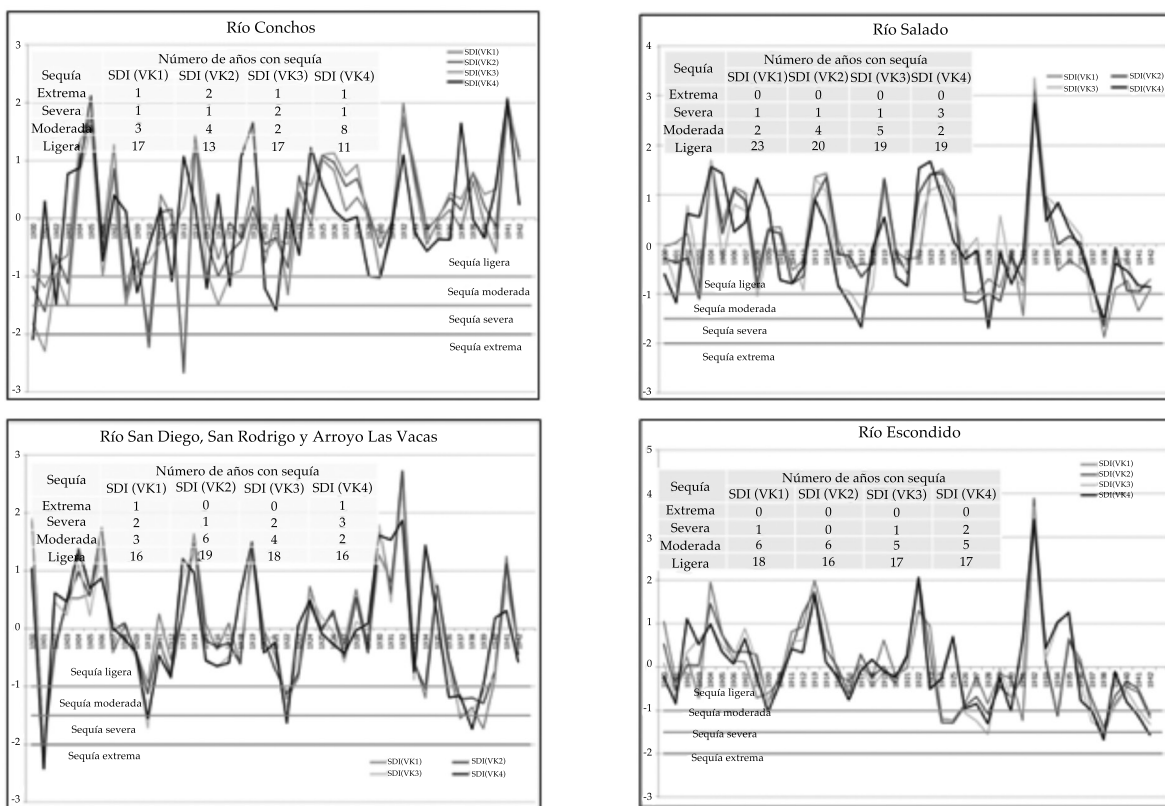


Figura 18. Valores de SDI referentes a los escurrimientos restituidos para los seis afluentes de la cuenca del río Bravo, en periodos de 3, 6, 9 y 12 meses.

ligera a extrema es el río Conchos, de acuerdo con los resultados obtenidos en el escenario (d) (ver la figura 20).

Al analizar el periodo 1950-2004, se observa que los valores del SDI_{anual} nunca llegan a una extrema sequía y sólo en los años 1956, 1994 y 1995, la sequía es severa (ver la figura 21).

De igual manera, al analizar todo el periodo de análisis, 1900-2004, de acuerdo con los valores del SDI_{anual} , nunca se presenta una sequía extrema, sólo se han tenido cinco años con sequías severas: 1917, 1921, 1956 y 1933-1994 (ver la figura 22).

Cabe mencionar que al analizar los escurrimientos mediante el SDI, en el río Bravo, a diferencia del río Colorado, las sequías extremas sólo se presentan en periodos menores a un año.

Así, en lo que se refiere a escurrimientos,

el afluente que tiene mayor impacto para una sequía extrema es el río Salado, y el afluente que tiene mayor influencia para una sequía de ligera a extrema es el río Conchos.

Conclusiones

Los índices SDI y SPI pueden ser una opción científica sólida de aplicación para los ríos Bravo y Colorado en el contexto del Tratado sobre Aguas Internacionales de 1944.

En la cuenca del río Colorado, con los resultados de precipitación, en tres años se ha presentado una sequía extrema, y en Arizona, Nuevo México, Utah y California, la precipitación tiene una tendencia a la baja. La precipitación medida en términos de SPI en la cuenca baja tiene influencia en el valor SPI de toda la cuenca en su conjunto.

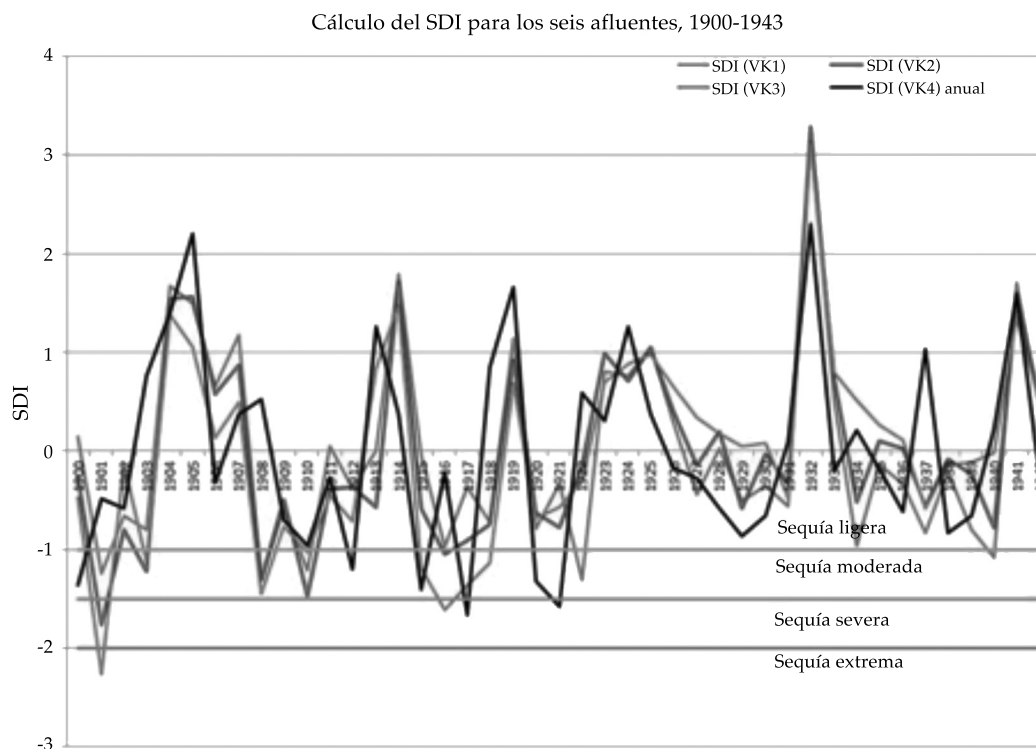


Figura 19. Valores de SDI referente a los escurrimientos restituidos para toda la cuenca del río Bravo, en periodos de 3, 6, 9 y 12 meses.

En tanto que, con los escurrimientos restituidos, se nota que hubo sequía extrema en la cuenca completa en tres años, y que la cuenca completa y cuenca alta muestran una enorme similitud entre sí, contrario a lo que sucede en la cuenca baja.

Para el río Colorado, la influencia de la cuenca alta es definitiva en el análisis de la sequía de acuerdo con el SDI, y el manejo del sistema hidráulico es sin duda un amortiguador o acelerador del impacto de la sequía hidrológica, además hay que considerar el factor del deshielo en el tiempo.

Con este mismo índice, en el río Bravo las sequías extremas sólo se presentan en periodos de referencia menores a un año.

El afluente que tiene mayor impacto para una sequía extrema es el río Salado, y el afluente que tiene mayor influencia para una sequía de ligera a extrema es el río Conchos.

Para esta misma cuenca, en el periodo comprendido de 1950-2004, conforme al SDI_{anual} no se ha presentado sequía extrema en los afluentes mexicanos referidos en el Tratado de 1944, pues nunca se ha rebasado el umbral de $7\,738\text{ hm}^3$, valor correspondiente a un $SDI = -2$.

Si se considera el periodo desde 1900 hasta 2004, el nuevo umbral de sequía extrema sería $9\,074\text{ hm}^3$, conforme al SDI.

Recibido: 27/04/12
Aceptado: 13/07/12

Referencias

ALDAMA, A. *Asistencia Técnica Especializada para la Propuesta de la Postura del Gobierno Mexicano en Cuanto a la Definición del Término "Extraordinaria Sequía" en el Marco del Tratado Internacional de 1944*. México, D.F., 2011.

Cuadro 8. Escenario (a) en el que no se considera la aportación de los tres afluentes agrupados, arroyo Las Vacas, y ríos San Diego y San Rodrigo.

Sequía	Número de años con sequía				Sumatoria por tipo de sequía
	SDI (Vk_1)	SDI (Vk_2)	SDI (Vk_3)	SDI (Vk_4)	
Extrema	0	0	1	0	1
Severa	0	2	2	3	7
Moderada	4	4	5	4	17
Ligera	22	19	12	19	72
Total	26	25	20	26	97

Cuadro 9. Escenario (b) en el que no se considera la aportación del río Escondido.

Sequía	Número de años con sequía				Sumatoria por tipo de sequía
	SDI (Vk_1)	SDI (Vk_2)	SDI (Vk_3)	SDI (Vk_4)	
Extrema	0	0	1	0	1
Severa	0	1	1	2	4
Moderada	5	4	6	4	19
Ligera	21	21	13	18	73
Total	26	26	21	24	97

Cuadro 10. Escenario (c) en el que no se considera la aportación del río Conchos.

Sequía	Número de años con sequía				Sumatoria por tipo de sequía
	SDI (Vk_1)	SDI (Vk_2)	SDI (Vk_3)	SDI (Vk_4)	
Extrema	1	0	0	0	1
Severa	0	1	2	2	5
Moderada	3	4	4	5	16
Ligera	23	22	19	14	78
Total	27	27	25	21	100

Cuadro 11. Escenario (d) en el que no se considera la aportación del río Salado.

Sequía	Número de años con sequía				Sumatoria por tipo de sequía
	SDI (Vk_1)	SDI (Vk_2)	SDI (Vk_3)	SDI (Vk_4)	
Extrema	1	2	1	0	4
Severa	1	1	1	1	4
Moderada	3	2	6	7	18
Ligera	19	17	12	16	64
Total	24	22	20	24	90

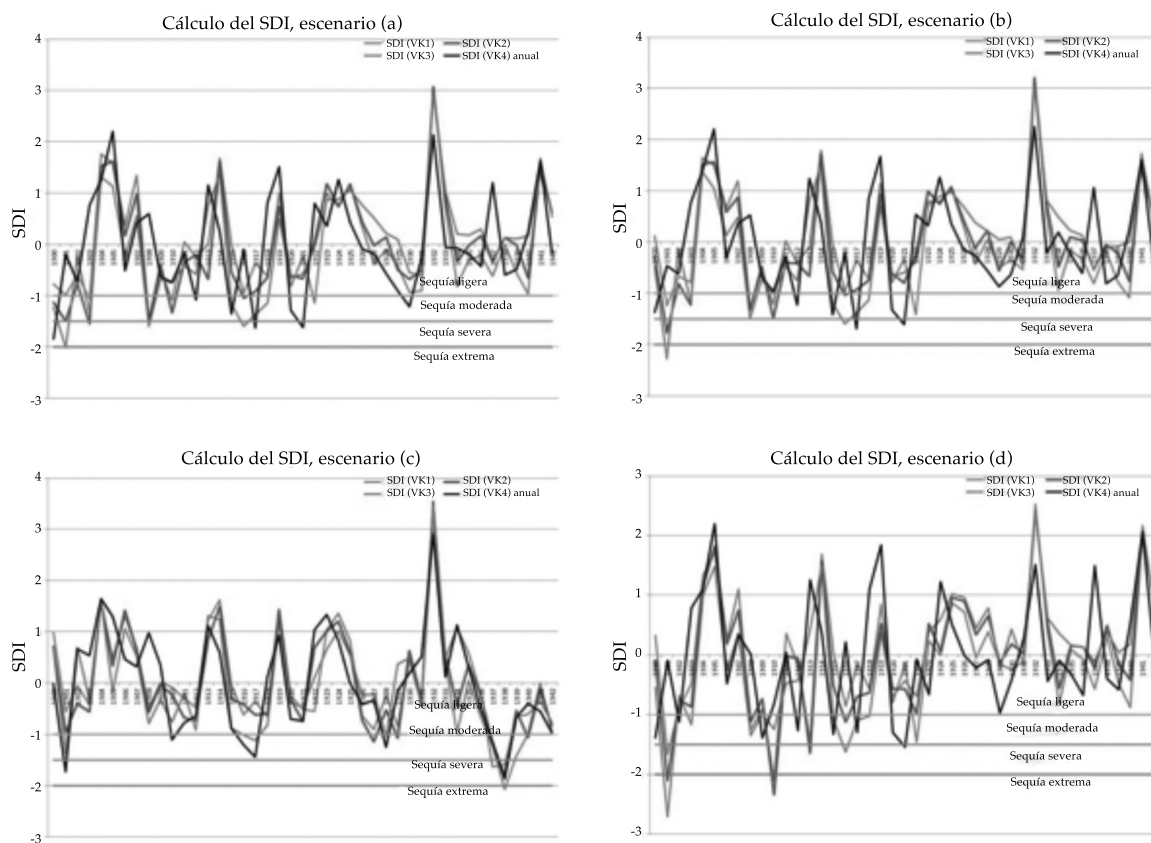


Figura 20. Valores de SDI para los escenarios a, b, c y d referente a los análisis, excluyendo uno por uno los tributarios más importantes en la cuenca del río Bravo, en periodos de 3, 6, 9 y 12 meses.

ALLEY, W.M. The Palmer Drought Severity Index: limitations and assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*. Vol. 23, 1984, pp. 1100-1109.

APARICIO, J. Índice de Sequía Extraordinaria. Presentación en Power Point. México, D.F., 2011.

ARREGUÍN, F. La sequía en México, *Ingeniería Civil*, Un 514/ Año LXII/Febrero 2012.

CILA. *Tratado de la distribución de las aguas internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América, 1944*. México, D.F.: Comisión Internacional de Límites y Aguas, Sección Mexicana.

COLORADO RIVER WATER USERS ASSOCIATION CONFERENCES. *Colorado River Basin Climate*. California, 2005.

HEIM, R. A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 83, 2002, pp. 1149-1165.

LÓPEZ, M. Análisis de sequías en el marco del Tratado de Aguas Internacionales de 1944. Presentación en Power Point. México, D.F., 2010.

McKEE, T.B., DOESKEN, N.J., and KLEIST, J. *Drought monitoring with multiple time scales*. Preprints of the 9th Conference on Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, California, 1995, pp. 179-184.

McKEE, T.B., DOESKIN, N.J., and KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the Conference on Applied Climatology*. Boston, 17-23 January, 1993, pp. 179-184.

NALBANTIS, I. Evaluation of Hydrological Drought Index. *European Water Publications*. Vol. 23/24, 2008, pp. 67-77.

NALBANTIS, I. and TSAKIRIS, G. Assessment of Hydrological Drought Revisited. *Water Resources Management*. Vol. 23, No. 5, 2009, pp. 881-897.

ORIVE DE ALBA, A. Informe Técnico sobre el Tratado Internacional de Aguas al Senado Mexicano. *Irrigación en México*. Vol. 26, núm. 3, julio-agosto-septiembre, 1945, pp. 24-84.

PALACIOS, E. *Asistencia técnica especializada para la determinación del término sequía extraordinaria en la cuenca de los seis afluentes del río Bravo y en la cuenca del río Colorado*,

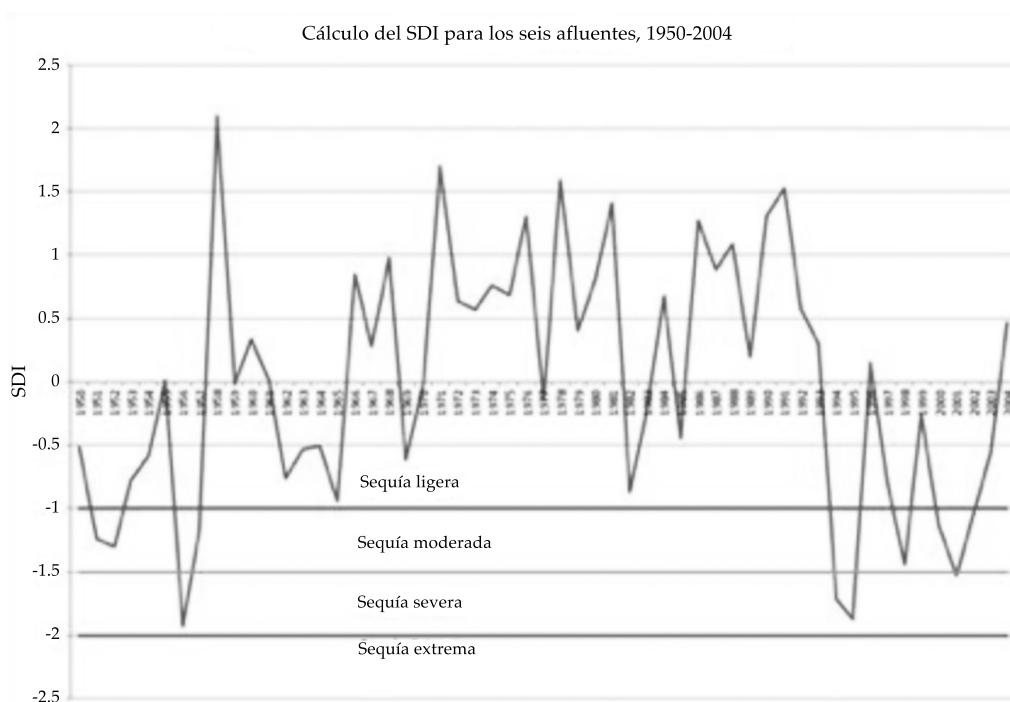


Figura 21. Valores de SDI_{anual} referente a los escurrimientos restituidos para toda la cuenca del río Bravo, 1950-2004.

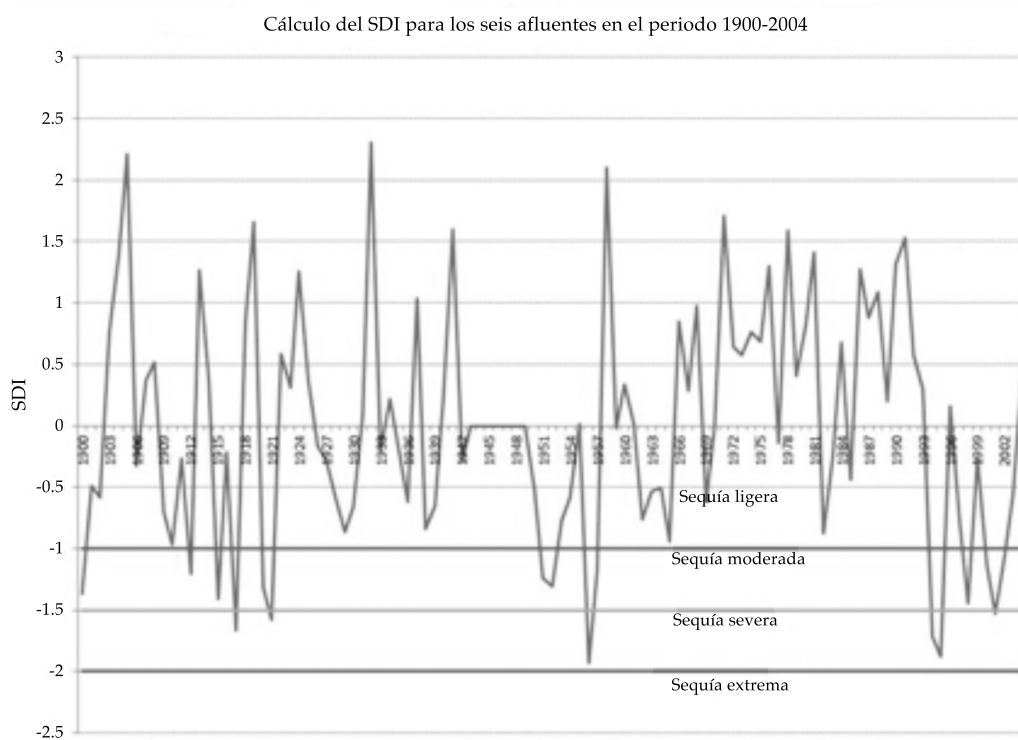


Figura 22. Valores de SDI_{anual} referente a los escurrimientos restituidos para toda la cuenca del río Bravo, periodo 1900-2004.

- señalados en el *Tratado sobre Aguas Internacionales de 1944*. México, D.F.: Organización Meteorológica Mundial-Comisión Nacional del Agua, 2010.
- PALMER, W.C. *Meteorological drought*. Documento de Investigación núm. 45. Washington, D.C.: Oficina Meteorológica del Departamento de Comercio, 1965a.
- PALMER, W.C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new Crop Moisture Index. *Weatherwise*. Vol. 21, 1965b, pp. 156-161.
- PANOFSKY, H.W. and BRIER, G.W. *Some Applications of Statistics to Meteorology*. Philadelphia: The Pennsylvania State University Press, 1968.
- RENDÓN, L. *Tratado sobre Distribución de Aguas Internacionales entre México y Estados Unidos: definición de sequía extraordinaria*. Presentación en Power Point. México, D.F., 2007.
- RENDÓN, L. *Premisas e indicadores para definir sequía extraordinaria conforme al Tratado de 1944: río Bravo*. Presentación en Power Point. México, D.F., 2011.
- TCEQ. *Iniciativa fronteriza de la TCEQ*. Austin: Texas Commission on Environmental Quality, 2009.
- TCEQ. *Propuesta de extraordinaria sequía, reunión de gobernadores fronterizos*. San Francisco: Texas Commission on Environmental Quality, 2007.

Abstract

ARREGUÍN-CORTÉS, F., LÓPEZ-PÉREZ, M., VELÁZQUEZ-MIRELES, C. & LÓPEZ-CORZO, R. *Analysis of drought in the context of the 1944 International Water Treaty*. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. IV, No. 1, January-March, 2013, pp. 117-148.

This study presents an analysis of drought in the basins of the Colorado and Bravo Rivers using the Streamflow Drought Index, SDI. For the Colorado River, three years of extreme drought (1934, 1977 and 2002) were recorded in the entire basin and its upper region, and four years (1928, 1929, 1935, and 1936) in the lower basin. Applying this same approach to the Bravo River, extreme drought was recorded for the K3 period (October-June) period during the agricultural year of 1901-1902. The Standardized Precipitation Index, SPI, was only applied in the Colorado River basin, where extreme drought was found in both the lower and the entire basin for the years 1950, 1956 and 1989. In addition, extreme drought also occurred in the upper basin during the latter year. These results are important to joint water management by Mexico and the United States in both basins in order to meet the demands of their inhabitants, fulfilling the promises established in the 1944 International Water Treaty and taking the measures needed concerning the impact of climate change on the hydrological cycle in the region.

Keywords: *drought, availability, Colorado and Bravo Rivers, indicators of drought.*

Dirección institucional de los autores

Dr. Felipe I. Arreguín Cortés

Ing. Mario López Pérez

M.I. César Velázquez Mireles

M.I. Raúl López Corzo

Comisión Nacional del Agua (Conagua)
Insurgentes Sur 2416, colonia Copilco el Bajo
Delegación Coyoacán
04340 México, D.F., MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 5174 4400
felipe.arreguin@conagua.gob.mx
mario.lopezperez@conagua.gob.mx
cesar.velazquez@conagua.gob.mx
raul.lopez@conagua.gob.mx