

CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUÍAS HIDROLÓGICAS EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO, MÉXICO

Hydrological Drought Characterization in the Rio Grande Basin, Mexico

David Ortega-Gaucin^{1‡}

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó la caracterización de los períodos de sequía hidrológica registrados históricamente en la sección mexicana de la cuenca del río Bravo, con el objeto de proporcionar un panorama amplio del fenómeno, que sirva de base para la adecuada planeación y manejo de los recursos hídricos superficiales en la cuenca. Para ello, se analizaron las aportaciones de agua a las presas de almacenamiento que se ubican en los principales afluentes mexicanos de este río. A partir de series históricas de datos hidrométricos, se estableció la mediana de los escurrimientos y, con base en esa mediana, se determinó el déficit o incremento, lo cual a su vez permite definir la duración y severidad de los períodos de sequía. Los resultados indican que en más del 50% de los años analizados se presentó algún grado de sequía, con aportaciones inferiores a la mediana histórica de hasta -91%, y períodos secos que van de uno a 14 años consecutivos. Se concluyó que en la mayor parte de la cuenca ocurrió un período de sequía extraordinaria que se extendió prácticamente a lo largo de 14 años (1992-2005), fue el más severo y prolongado del cual se tiene registro.

Palabras clave: *déficit hídrico, río, presa de almacenamiento, distrito de riego.*

SUMMARY

This paper presents the characterization of hydrological drought periods that have been historically recorded for the Mexican section of the Rio Grande basin, with the purpose of providing a comprehensive

picture of the phenomenon, one that will serve as a basis for the proper planning and management of surface water resources in the basin. To do this, we analyze the water contributions to the storage dams located on the main Mexican tributaries of this river. On the basis of the historical series of hydrometric data, establishing the median runoff and, based on that median, the deficit or increase is determined, allowing definition of the duration and severity of drought periods. The results indicate that more than 50% of the analyzed years had a certain degree of drought, with contributions lower than the historical median decreasing up to -91%, and drought periods ranging from one to fourteen consecutive years. It is concluded that in most of the basin an extraordinary drought period occurred, lasting 14 years (1992-2005), its most severe and prolonged recorded drought.

Index words: *water deficit, river, storage dam, irrigation district.*

INTRODUCCIÓN

La sequía es considerada un fenómeno climático recurrente caracterizado por una reducción en la precipitación pluvial, que no presenta trayectorias definidas y que tiende a extenderse de manera irregular a través del tiempo y el espacio. La severidad de una sequía depende no solamente del grado de reducción de la lluvia, su duración o su extensión geográfica, sino también de las demandas del recurso hídrico para la permanencia de los sistemas naturales y para el desarrollo de las actividades humanas (Wilhite y Glantz, 1985; Mckee *et al.*, 1993; Wilhite, 2000; Nalbantis, 2008). La sequía ha sido, con frecuencia, la causa de migraciones masivas, hambrunas y conflictos sociales, e incluso, se le atribuye la desaparición de civilizaciones antiguas completas (Seavoy, 1986; Hidore, 1996; Florescano, 2000; Gill, 2008).

En la literatura se reconoce que existen diferentes tipos de sequía, los cuales están determinados por los tipos de impactos que trae como consecuencia el fenómeno (Wilhite y Glantz, 1985; Wilhite, 2000). Así,

¹ Instituto del Agua del Estado de Nuevo León (IANL). Ave. Alianza Norte 306, Parque Investigación e Innovación Tecnológica. 66600 Apodaca, Nuevo León, México.

[‡] Autor responsable (ortega.gaucin@ianl.org.mx)

se habla de sequía desde el punto de vista meteorológico (McKee *et al.*, 1993; Barakat y Handoufe, 1998; Bergaoui y Alouini, 2001), hidrológico (Barakat y Handoufe, 1998; Nalbantis, 2008), agrícola (Bootsma *et al.*, 1996; Barakat y Handoufe, 1998), y socioeconómico (Barakat y Handoufe, 1998; Bergaoui y Alouini, 2001). Sin embargo, los diferentes tipos de sequía se deben a una disminución de la lluvia en uno o varios años con respecto a la considerada como normal (generalmente la media o la mediana de los datos observados) en una zona o región determinada. De esta manera, en la gran mayoría de las definiciones de sequía propuestas por los diferentes autores, la relación entre el suministro de agua en un momento dado y el considerado como normal, juegan un papel importante.

Uno de los sistemas hidrológicos más importantes de México, donde el problema de la sequía es una situación frecuente, es la cuenca del río Bravo. Esta cuenca ha sido objeto de múltiples foros, estudios y debates en los últimos años debido a que su problemática ha adquirido una connotación socioeconómica, ambiental y binacional (Linares, 2004; CILA, 2005, 2011 y 2012). La mayor parte de la cuenca se ubica en una zona que, por sus características climáticas, se considera árida o al menos semiárida, presentándose un alto grado de variación en la disponibilidad del recurso hídrico, por lo que los diferentes sectores son altamente vulnerables a los impactos producidos por las sequías y el uso inapropiado del agua.

La demanda de agua en la cuenca se ha acentuado conforme se ha incrementado la acelerada urbanización e industrialización de la zona fronteriza; y la competencia por el agua entre los usuarios (principalmente agrícolas) tanto en la parte alta y baja de la cuenca, como en ambos lados de la frontera entre México y Estados Unidos, lo que ha generado diversas controversias locales, regionales e incluso internacionales (Linares, 2004). Por las características de río internacional, el uso de las aguas del río Bravo y las de la mayoría de sus afluentes, está sujeto a las regulaciones establecidas en el "Tratado sobre distribución de aguas internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América", celebrado en el año de 1944, así como a las vedas que sobre su uso se establecieron en 1953 y 1955. Con relación al tratado, es importante señalar que una parte de las aguas del río Bravo y de sus afluentes mexicanos se asigna a los EUA; es decir, una tercera parte del volumen de agua que llega a la corriente

principal del río Bravo procedente de los ríos Conchos, San Diego, San Rodrigo, Escondido, Salado y Arroyo de las Vacas. El tratado estipula que México debe entregar a EUA un volumen mínimo promedio anual de 431.72 hm³ en ciclos que se contabilizan cada cinco años; es decir, al final de cada ciclo el volumen mínimo de entrega es de 2158.6 hm³, y en caso de no cumplir con esta cuota por causa de sequía extraordinaria, el adeudo se acumula para el siguiente ciclo, y se paga con agua procedente en su mayor parte de la cuenca del río Conchos (CILA, 2008).

En este sentido, debido a las presiones que se tienen para aumentar el aprovechamiento del agua del río Bravo y dadas las características de ser aguas internacionales y los compromisos que se tienen con los EUA, es muy importante que se hagan respetar las vedas establecidas desde 1953; pues diversos estudios han comprobado que el flujo del recurso hídrico hacia el río Bravo proveniente de sus tributarios, como el río Conchos localizado en la parte alta de la cuenca, su principal afluente mexicano, se han reducido significativamente durante los últimos años (COLPOS, 2008).

En este contexto, aunque en la práctica puede ser sumamente difícil predecir la ocurrencia de un período de sequía, el conocimiento y análisis continuos de las diversas fuentes de abastecimiento y el entendimiento del impacto de las sequías históricas registradas, pueden ayudar a los planeadores y operadores de los sistemas hidráulicos e hidrológicos a anticiparse a los efectos de la sequía (Wilhite, 1991). Por ello, el presente trabajo tuvo como objetivo, la caracterización de los períodos de sequía hidrológica registrados históricamente en la cuenca del río Bravo (sección mexicana), con el objeto de proporcionar un panorama amplio del fenómeno, que sirva de base para la adecuada planeación y manejo de los recursos hídricos superficiales en la cuenca.

Para analizar la sequía hidrológica, varios autores utilizan como datos hidrométricos, las aportaciones a las presas, el caudal de entrada o el balance integral del ciclo hidrológico a escala de una cuenca aforada, en este caso una presa de almacenamiento (McKee *et al.*, 1993; Fournier, 2001; Bergaoui y Alouini, 2001; Bordi y Sutura, 2007; Nalbantis, 2008). Es más común encontrar análisis de sequía hidrológica con datos de entradas anuales de una presa con área de captación bien definida (a escala de cuenca o subcuenca), donde existen algunas estructuras hidráulicas bien instrumentadas con mediciones periódicas (diarias, semanales o mensuales). El hecho de obtener los parámetros estadísticos de una

muestra de valores de aportaciones anuales, permite conocer la media, mediana, variación y sesgo, y sobre el valor medio o el mediano se establecen anomalías: positivas en los excesos y negativas en los déficits. Esto en sí mismo es una manera de caracterizar el fenómeno: las diferencias o desviaciones de cada período respecto a su media (Velasco *et al.*, 2005; Nalbantis, 2008). No obstante, hay que considerar que la media aritmética generalmente es un estadígrafo robusto en tanto represente bien la probabilidad de ocurrencia de dicho valor, por lo que cuando se utiliza este estadígrafo para definir la condición de sequía puede conducir a error, especialmente en zonas áridas, puesto que la ocurrencia del valor medio es poco probable. Por ello, dado que la mediana es considerada un estadígrafo más robusto que la media (Lehmann y Romano, 1986), en este trabajo se utiliza la mediana (cuya probabilidad de ocurrencia es de 50%) para determinar el umbral de sequía hidrológica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

La cuenca del río Bravo se ubica en la frontera entre México y Estados Unidos y pertenece a la Región Hidrológica No. 24, la cual comprende tres subregiones: Poniente, Oriente y Oriente Bajo Río Bravo. El área de estudio comprende el tramo del río Bravo que va desde Fort Quitman hasta la presa internacional Falcón, abarca las dos primeras subregiones hidrológicas mencionadas anteriormente. La cuenca del río Bravo hasta la cortina de la presa internacional Falcón tiene un área de 415 757 km², de los que aproximadamente 188 459 km² pertenecen a México y 227 298 km² a Estados Unidos. En la sección mexicana, esta cuenca abarca parte del estado de Chihuahua, una pequeña porción del estado de Durango y una amplia extensión territorial de los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas (Figura 1).

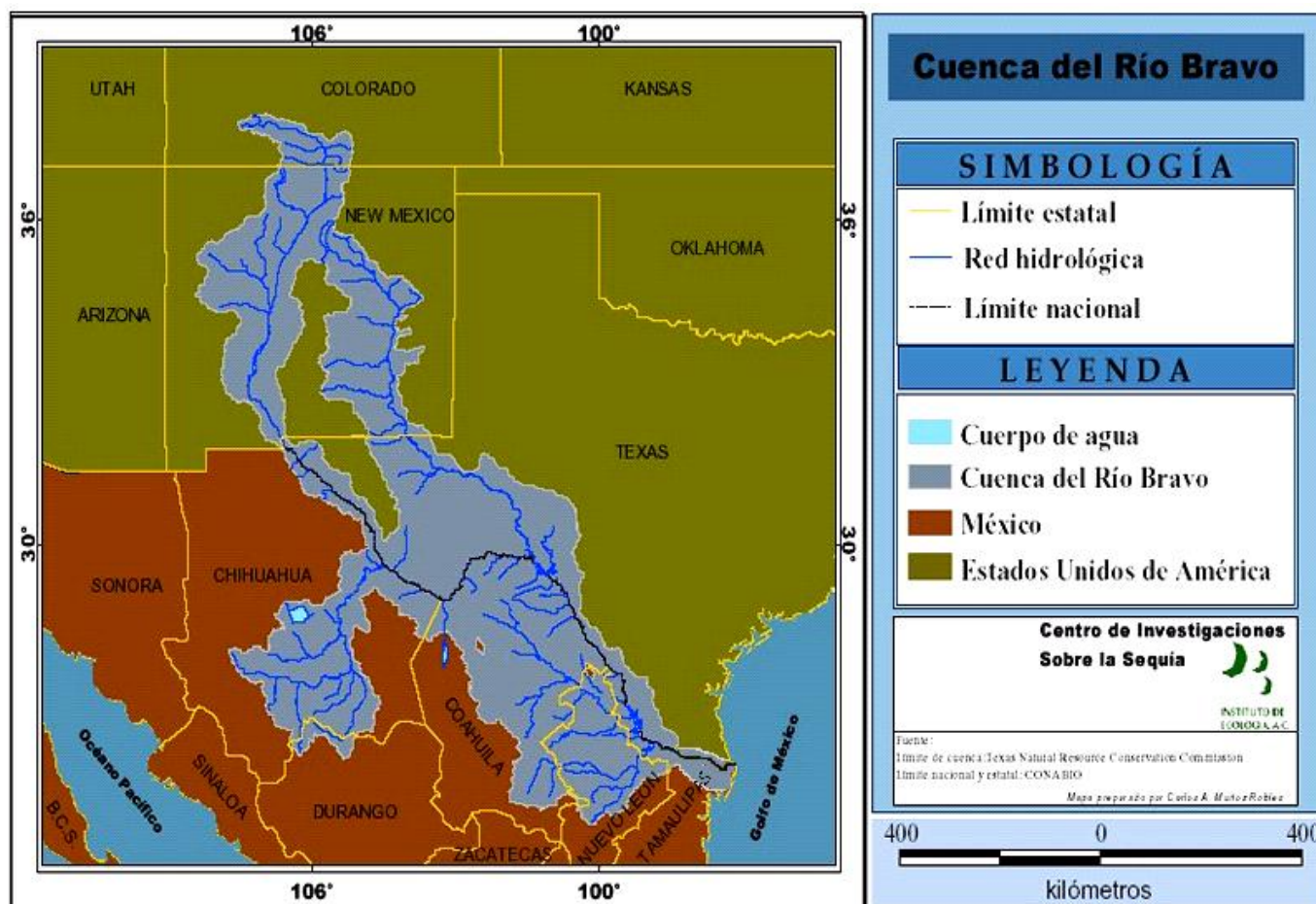


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Bravo en México y Estados Unidos de América.

El principal uso que tienen las aguas mexicanas del río Bravo y sus afluentes es agrícola. Además de las Unidades de Riego distribuidas en la cuenca, se tienen 10 Distritos de Riego que dominan un área aproximada de 450 661 ha, y para la regulación del agua hay nueve presas de almacenamiento, más las dos presas internacionales, La Amistad y Falcón (Figura 2).

En el presente trabajo se analizaron las corrientes que están consideradas dentro del Tratado Internacional de 1944, las cuales se ilustran de manera esquemática en la Figura 3. Asimismo, en el Cuadro 1 se presenta la relación de los ríos y presas consideradas en el análisis, así como algunos datos básicos de dichas presas como son la capacidad de almacenamiento y el período de registro de aportaciones que cada una de ellas tiene. Igualmente, en el Cuadro 2 se presenta un resumen de las estadísticas básicas de los registros de aportaciones históricas de las presas de almacenamiento analizadas.

Análisis de la Sequía Hidrológica

Para los propósitos del presente trabajo, se utilizó el valor de la mediana (cuya probabilidad de ocurrencia es

de 50%) de las aportaciones de agua a las presas de almacenamiento para determinar el umbral de sequía hidrológica. Así, se considera como *año seco* cualquier año en que las aportaciones o escurrimientos que ingresan a una presa de almacenamiento son menores al valor de la mediana de los registros históricos, por lo que la *sequía hidrológica* es un período de años secos consecutivos. Así, se puede decir que un período de sequía hidrológica inicia y termina con el primer y el último año seco consecutivo, respectivamente.

Desde el punto de vista de la operación de presas de almacenamiento, para suministrar los volúmenes de agua a los usos público-urbano, industrial y agrícola, hay dos parámetros que son importantes para la caracterización de las sequías hidrológicas: la duración y la severidad (Barakat y Handoufe, 1998; Bergaoui y Alouini, 2001; Velasco *et al.*, 2005; Nalbantis, 2008). Por ello, en este trabajo se propusieron los siguientes conceptos para realizar la caracterización correspondiente:

1.- *Duración (D)*: número de años consecutivos con aportaciones inferiores a la mediana, adimensional.



Figura 2. Ubicación de los distritos de riego, principales presas y afluentes del río Bravo (sección mexicana).

$$D = \sum_{i=1}^n t_i \quad (1)$$

donde: t_i = año i con aportaciones de agua inferiores a la mediana, adimensional; i = índice del número de años, adimensional; n = número de años con registro, adimensional.

2.- *Severidad (S)*: volumen deficitario acumulado en todo el período de sequía, hm^3 .

$$S = \sum_{i=1}^n x_i - x_m \quad (2)$$

donde: x_i = aportación de agua en el año i , hm^3 ; x_m = aportación mediana de agua, hm^3 .

En el presente trabajo se consideró que la severidad permite definir la *sequía hidrológica extraordinaria*, para un registro de períodos de sequía ocurridos en una cuenca o presa de almacenamiento, como la que tiene la severidad máxima (S_{max}), es decir, el mayor volumen deficitario acumulado en todo el período de sequía. A su

vez, se propone el concepto de *severidad relativa (S_r)*, que sirve para clasificar la ocurrencia de las sequías en ligeras, intensas y extraordinarias, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$S_r = \frac{S_j}{S_{max}} \quad (3)$$

donde: S_j = severidad de la sequía j , hm^3 ; j = índice de sequías, adimensional; S_{max} = severidad máxima, hm^3 .

Los rangos de los valores de la severidad relativa que se proponen y se utilizan en este artículo para clasificar las sequías hidrológicas se encuentran en el Cuadro 3.

De esta manera, con base en las definiciones y parámetros descritos anteriormente, se realizó el análisis y caracterización de los períodos de sequía hidrológica ocurridos históricamente en los afluentes mexicanos del río Bravo, mediante el análisis de las desviaciones de las aportaciones de agua con respecto a la mediana histórica en cada presa de almacenamiento. Los datos históricos de aportaciones de agua utilizados para

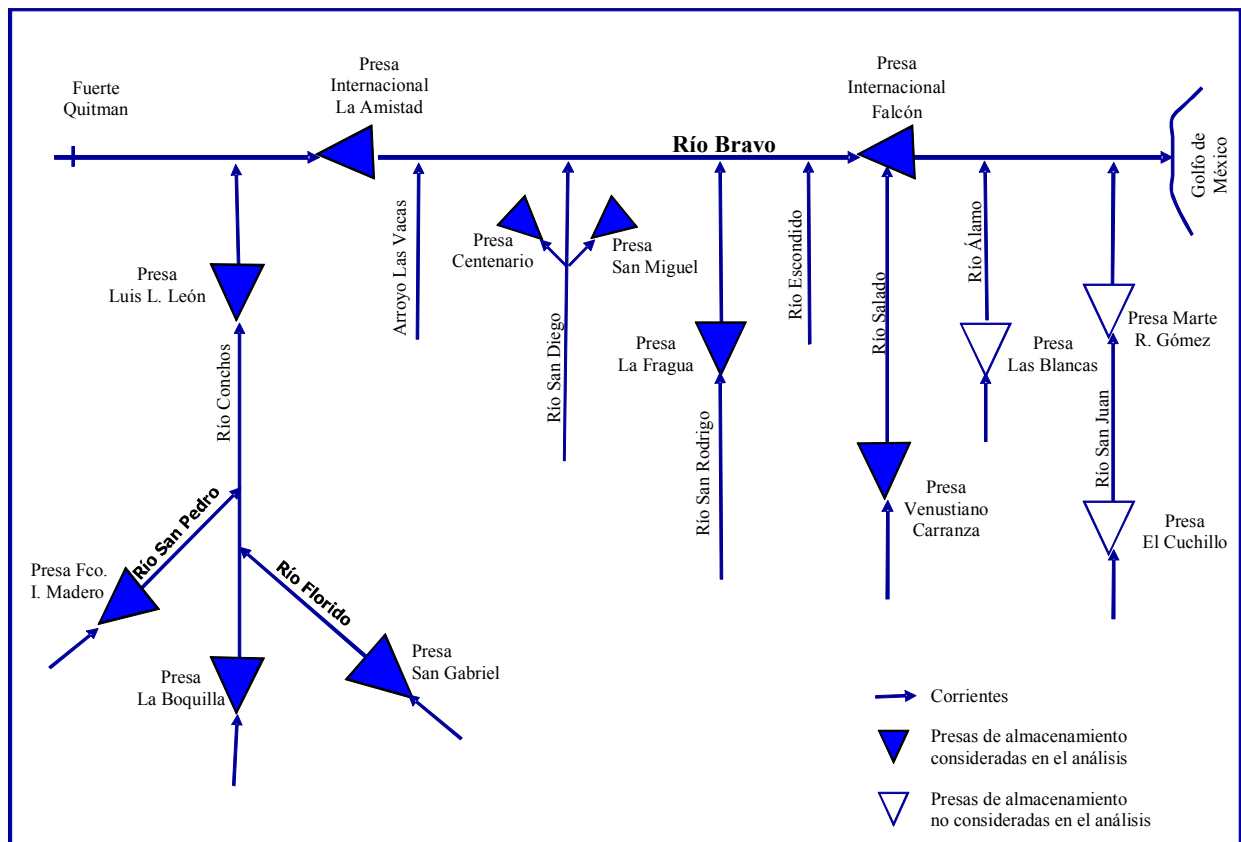


Figura 3. Diagrama del sistema hidrológico de la cuenca del río Bravo (sección mexicana).

Cuadro 1. Ríos y presas de almacenamiento analizados.

Río	Presa de almacenamiento	Área de captación [†]	Capacidad de almacenamiento [†]	Registro de aportaciones [†]	
		km ²	hm ³	Período	No. de años
Florido	San Gabriel	7 395	255.4	1943-2012	70
Conchos	La Boquilla	19 478	2 903.3	1935-2012	78
San Pedro	Fco. I. Madero	10 461	348.0	1949-2012	64
Conchos	Luis L. León	16 351	356.0	1949-2012	64
Bravo	La Amistad	45 155	1 702.5	1969-2012	44
San Diego	Centenario	2 225	24.7	1988-2012	25
San Diego	San Miguel	2 225	20.2	1988-2012	25
San Rodrigo	La Fragua	2 717	45.0	1935-2012	78
Salado	Venustiano Carranza	25 436	1 312.9	1940-2012	73
Bravo	Falcón	34 188	1 355.2	1968-2012	45

Fuente: elaborado con información proporcionada por CONAGUA (2013). [†] En el caso de las presas La Amistad y Falcón, los datos corresponden solamente a la parte mexicana, y fueron proporcionados por la Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos de América (CILA).

el análisis fueron proporcionados directamente por las oficinas centrales de CONAGUA.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos, en todas las presas analizadas, el número de años secos es igual o superior al 50%, y se han registrado períodos secos de máxima duración desde cuatro hasta 14 años consecutivos, con déficit máximo de aportaciones respecto a la mediana desde -55.6 hasta -97.0%. Se observa también que los años más secos en la mayoría de los casos, se ubican en la década de los 90's del siglo pasado y a principios del presente siglo (Cuadro 4).

A continuación se presenta: la duración, severidad, severidad relativa y el tipo de sequía correspondiente a cada uno de los períodos de sequía hidrológica ocurridos históricamente en las presas de almacenamiento analizadas y se examina cada una de ellas por separado (Cuadros 5 al 14).

En el caso de la presa San Gabriel, que se alimenta de las aguas que escurren en el río Florido, se detectaron al menos tres períodos de sequía hidrológica prolongada (con duración mayor o igual a cuatro años); el período de máxima duración es de nueve años (1997-2005) y corresponde al de sequía extraordinaria, con un déficit acumulado en las aportaciones de -413.2 hm³. A este período le antecede otro período de sequía intensa de

Cuadro 2. Estadísticas básicas de las aportaciones de agua a las presas de almacenamiento.

Presa de almacenamiento	Media	Mediana	Máximo	Mínimo	Desviación estándar	C.V.
	----- hm ³ año ⁻¹ -----				hm ³	%
San Gabriel	156.4	103.0	628.7	10.9	145.0	92.7
La Boquilla	1 186.5	1 001.5	3 529.2	137.7	722.3	60.9
Fco. I. Madero	382.1	316.2	941.3	36.7	248.9	65.1
Luis L. León	548.2	497.0	3 012.1	43.4	439.5	80.2
La Amistad	898.6	702.0	2 340.9	292.7	540.5	60.2
Centenario	21.6	21.6	39.1	10.0	6.7	30.8
San Miguel	19.3	18.4	33.5	10.4	5.2	27.0
La Fragua	107.6	58.1	928.1	2.9	149.2	138.6
V. Carranza	503.0	262.3	5 128.8	28.2	729.7	145.1
Falcón	678.3	446.9	4 349.1	148.6	786.8	116.0

Fuente: elaborado con la información proporcionada directamente por CONAGUA y CILA (2013). C.V. = coeficiente de variación.

Cuadro 3. Clasificación de las sequías hidrológicas con base en la severidad relativa.

Tipo de sequía	Severidad relativa (S_r)
Ligera	0.01 a 0.25
Intensa	0.26 a 0.99
Extraordinaria	1.00

dos años (1994-1995), con un solo año húmedo que los separa (1996), por lo que se afirma que prácticamente el período de sequía extraordinaria ocurrido en esta presa abarcó desde el año 1994 hasta el año 2005 (Cuadro 5).

La presa La Boquilla, que almacena y regula el agua del río Conchos, presenta un comportamiento muy similar a la presa San Gabriel. En esta presa también ocurrieron tres períodos de sequía prolongada (con duración mayor o igual a cuatro años); el período de sequía extraordinaria fue de nueve años (1997-2005), con un déficit acumulado en las aportaciones con relación a la mediana de -2927.4 hm^3 . Entre este período y el que le antecede con duración de dos años (1994-1995), existe solamente un año húmedo (1996), por lo cual se considera que el período de sequía extraordinaria se extendió desde el año 1994 hasta el año 2005 (Cuadro 6).

Algo similar a los dos casos anteriores ocurre en la presa Francisco I. Madero, alimentada por los escurrimientos del río San Pedro, donde se observa que han ocurrido al menos dos períodos de sequía prolongada (con duración mayor o igual a cuatro años); el período de sequía extraordinaria fue de nueve años (1997-2005), con un déficit acumulado en las aportaciones de

-877.8 hm^3 . Entre este período de sequía y el que le antecedió (1992-1995), existe solamente un año húmedo (1996), por lo que, al igual que en las dos presas anteriores, se considera que el período de sequía extraordinaria se extendió desde el año 1992 hasta el año 2005 (Cuadro 7).

Analizando las aportaciones de agua provenientes del río Conchos que se almacenan en la presa Luis L. León, se observó que se han presentado tres períodos de sequía con duración mayor o igual a cuatro años. En este caso el período de sequía extraordinaria fue de 12 años (1994-2005), con un déficit acumulado en las aportaciones de -4276.6 hm^3 (Cuadro 8).

La gran similitud existente en el comportamiento de las aportaciones de agua y los períodos secos ocurridos en las presas San Gabriel, La Boquilla, Fco. I. Madero y Luis L. León, se explica fácilmente porque todas estas presas se ubican dentro de la subcuenca hidrológica del río Conchos y son alimentadas por dicho río (en el caso de las presas La Boquilla y Luis L. León) y por sus afluentes (en el caso de las presas San Gabriel y Fco. I. Madero). Lo anterior pone de manifiesto la gravedad del problema de la sequía en la subcuenca del río Conchos, que se prolongó prácticamente durante 12 años (1994-2005). El problema de la escasez de agua ha afectado de manera significativa a todos los usuarios del vital líquido en la cuenca, pero principalmente se han visto afectados los usuarios de los distritos de riego 005 Delicias, 090 Bajo Río Conchos y 103 Río Florido, ubicados en el estado de Chihuahua. En estos distritos, en algunos años se han llegado a reducir hasta en un 80% las superficies que se riegan con aguas superficiales,

Cuadro 4. Estadísticas de las aportaciones anuales mínimas de aguas a las presas de almacenamiento analizadas.

Presa de almacenamiento	Años con registro	Años secos		Período de sequía más largo		Déficit máximo de aportaciones respecto a la mediana	
		Número años	%	Período	Número años	%	Año de registro
San Gabriel	70	35	50.0	1997-2005	9	-89.4	1994
La Boquilla	78	39	50.0	1997-2005	9	-86.3	1951
Fco. I. Madero	64	32	50.0	1997-2005	9	-88.4	1994
Luis L. León	64	32	50.0	1994-2005	12	-91.3	1996
La Amistad	44	22	50.0	1994-2007	14	-58.3	2012
Centenario	25	13	52.0	2003-2006	4	-53.6	2001
San Miguel	25	13	52.0	2003-2008	6	-43.5	2001
La Fragua	78	39	50.0	1994-2006	13	-91.8	1995
Venustiano C.	73	37	50.6	1994-2006	13	-89.2	1984
Falcón	45	26	51.1	1993-2002	10	-66.8	2000

pero el problema se ha mitigado aumentando las extracciones del acuífero, con el consecuente aumento en los costos de operación y encarecimiento de los bienes y servicios en la región. No obstante,

la productividad del agua se ha ido incrementando debido a que cuando el agua es escasa, los agricultores tienden a sembrar solamente los cultivos más rentables (Ortega-Gaucin *et al.*, 2009).

Cuadro 5. Períodos de sequía hidrológica en la presa San Gabriel.

Año		Duración	Severidad	Severidad relativa	Tipo de sequía
Inicial	Final	Número de años	hm ³		
1948	1948	1	-44.9	0.11	Ligera
1950	1954	5	-142.8	0.35	Intensa
1956	1957	2	-77.2	0.19	Ligera
1959	1959	1	-2.3	0.01	Ligera
1962	1965	4	-160.4	0.39	Intensa
1969	1970	2	-78.2	0.19	Ligera
1977	1977	1	-28.6	0.07	Ligera
1979	1980	2	-124.5	0.30	Intensa
1982	1983	2	-125.9	0.30	Intensa
1985	1985	1	-51.0	0.12	Ligera
1989	1989	1	-51.9	0.13	Ligera
1992	1992	1	-60.1	0.15	Ligera
1994	1995	2	-169.2	0.41	Intensa
1997	2005	9	-413.2	1.00	Extraordinaria
2007	2007	1	-11.7	0.03	Ligera
2009	2009	1	-10.6	0.03	Ligera
2011	2011	1	-59.7	0.14	Ligera

Cuadro 6. Períodos de sequía hidrológica en la presa La Boquilla.

Año		Duración	Severidad	Severidad relativa	Tipo de sequía
Inicial	Final	Número de años	hm ³		
1935	1935	1	-90.2	0.03	Ligera
1937	1937	1	-133.7	0.05	Ligera
1940	1940	1	-377.1	0.13	Ligera
1945	1946	2	-267.3	0.09	Ligera
1948	1948	1	-545.6	0.19	Ligera
1950	1954	5	-2406.0	0.82	Intensa
1956	1957	2	-1203.9	0.41	Intensa
1959	1959	1	-234.9	0.08	Ligera
1961	1965	5	-1429.2	0.49	Intensa
1969	1969	1	-550.2	0.19	Ligera
1977	1977	1	-330.2	0.11	Ligera
1979	1979	1	-6.4	0.00	Ligera
1982	1982	1	-514.0	0.18	Ligera
1985	1985	1	-102.2	0.03	Ligera
1994	1995	2	-1407.5	0.48	Ligera
1997	2005	9	-2927.4	1.00	Extraordinaria
2007	2007	1	-137.3	0.05	Ligera
2009	2009	1	-90.6	0.03	Ligera
2011	2012	2	-1077.7	0.37	Intensa

La presa internacional La Amistad almacena los escurrimientos del río Bravo, en ésta el período de sequía extraordinaria fue de 14 años (1994-2007), con un déficit acumulado en las aportaciones con relación a la mediana de -2851.2 hm³ (Cuadro 9).

En la presa Centenario, que almacena los escurrimientos del río San Diego, ha ocurrido solamente un período de sequía prolongada con duración de cuatro años consecutivos (2003-2006) y corresponde al de sequía extraordinaria, cuyo déficit acumulado es de -27.3 hm³ (Cuadro 10).

De manera similar a la presa Centenario, en la presa San Miguel solamente ha ocurrido un período de sequía prolongado con duración de seis años consecutivos

(2003-2008) y corresponde al de sequía extraordinaria, el cual tiene un déficit acumulado en las aportaciones de -17.7 hm³ (Cuadro 11).

En la presa La Fragua, que almacena las aguas que escurren por el río San Rodrigo, han ocurrido al menos cuatro períodos de sequía hidrológica prolongada (con duración mayor o igual a cuatro años). El período de sequía extraordinaria fue de trece años (1994-2006), con un déficit acumulado en las aportaciones de -132.8 hm³ (Cuadro 12).

En la presa Venustiano Carranza, que almacena los escurrimientos del río Salado, han ocurrido al menos cuatro períodos de sequía prolongada (con duración mayor o igual a cuatro años consecutivos); el período

Cuadro 7. Períodos de sequía hidrológica en la presa Francisco I. Madero.

Año		Duración	Severidad	Severidad relativa	Tipo de sequía
Inicial	Final	Número de años	hm ³		
1950	1951	2	-315.9	0.36	Intensa
1953	1953	1	-114.5	0.13	Ligera
1956	1956	1	-205.8	0.23	Ligera
1961	1962	2	-155.4	0.18	Ligera
1964	1965	2	-226.4	0.26	Intensa
1969	1969	1	-109.5	0.12	Ligera
1977	1977	1	-133.5	0.15	Ligera
1982	1983	2	-294.2	0.34	Intensa
1985	1985	1	-110.9	0.13	Ligera
1987	1987	1	-12.8	0.01	Ligera
1989	1989	1	-39.2	0.04	Ligera
1992	1995	4	-623.9	0.71	Intensa
1997	2005	9	-877.8	1.00	Extraordinaria
2007	2007	1	-95.2	0.11	Ligera
2009	2009	1	-83.2	0.09	Ligera
2011	2012	2	-357.8	0.41	Intensa

Cuadro 8. Períodos de sequía hidrológica en la presa Luis L. León.

Año		Duración	Severidad	Severidad relativa	Tipo de sequía
Inicial	Final	Número de años	hm ³		
1949	1957	9	-2005.8	0.47	Intensa
1959	1959	1	-32.4	0.01	Ligera
1962	1965	4	-239.9	0.06	Ligera
1967	1967	1	-31.8	0.01	Ligera
1983	1983	1	-49.7	0.01	Ligera
1994	2005	12	-4276.6	1.00	Extraordinaria
2007	2007	1	-263.8	0.06	Ligera
2009	2009	1	-130.1	0.03	Ligera
2011	2012	2	-600.1	0.14	Ligera

Cuadro 9. Periodos de sequía hidrológica en la presa La Amistad.

Año		Duración	Severidad	Severidad relativa	Tipo de sequía
Inicial	Final	Número de años	hm ³		
1970	1971	2	-171.4	0.06	Ligera
1973	1973	1	-24.8	0.01	Ligera
1977	1977	1	-348.4	0.12	Ligera
1983	1983	1	-91.1	0.03	Ligera
1994	2007	14	-2851.2	1.00	Extraordinaria
2009	2009	1	-99.2	0.03	Ligera
2011	2012	2	-774.7	0.27	Intensa

Cuadro 10. Periodos de sequía hidrológica en la presa Centenario.

Año		Duración	Severidad	Severidad relativa	Tipo de sequía
Inicial	Final	Número de años	hm ³		
1988	1989	2	-8.1	0.30	Intensa
1992	1992	1	-6.1	0.22	Ligera
1994	1994	1	-1.7	0.06	Intensa
1999	1999	1	-5.8	0.21	Ligera
2001	2001	1	-11.6	0.42	Intensa
2003	2006	4	-27.3	1.00	Extraordinaria
2009	2009	1	-1.4	0.05	Ligera
2011	2012	2	-0.5	0.02	Ligera

Cuadro 11. Periodos de sequía hidrológica en la presa San Miguel.

Año		Duración	Severidad	Severidad relativa	Tipo de sequía
Inicial	Final	Número de años	hm ³		
1989	1989	1	-0.4	0.02	Ligera
1992	1992	1	-0.3	0.02	Ligera
1998	1998	1	-0.6	0.03	Ligera
2001	2001	1	-8.0	0.45	Intensa
2003	2008	6	-17.7	1.00	Extraordinaria
2010	2012	3	-7.6	0.43	Intensa

de sequía más prolongado fue de trece años (1994-2006), pero el de sequía hidrológica extraordinaria fue de sólo ocho años (1950-1957), con un déficit acumulado en las aportaciones con relación a la mediana de -1098.1 hm³ (Cuadro 13).

En la presa Falcón, que se abastece de los volúmenes escurridos en la parte baja del río Bravo, se observó un solo período de sequía prolongada con duración de diez años consecutivos (1993-2002), el cual corresponde al de sequía extraordinaria, cuyo déficit acumulado en las aportaciones es de -1843.8 hm³ (Cuadro 14).

El análisis de las aportaciones de agua a las presas de almacenamiento ubicadas en los principales afluentes mexicanos del río Bravo, permite analizar y caracterizar de manera conveniente los períodos de sequía hidrológica registrados históricamente en la cuenca. La irregularidad de las aportaciones a las presas de almacenamiento es bastante pronunciada. En más del 50% del período analizado en cada presa, ocurren aportaciones inferiores a la mediana, registrándose años secos con déficit que va desde -3% hasta -91%, y períodos de sequía cuya duración varía desde uno hasta 14 años consecutivos.

Cuadro 12. Períodos de sequía hidrológica en la presa La Fragua.

Año		Duración	Severidad	Severidad relativa	Tipo de sequía
Inicial	Final	Número de años	hm ³		
1937	1940	4	-129.3	0.97	Intensa
1942	1943	2	-20.5	0.15	Ligera
1947	1948	2	-19.1	0.14	Ligera
1950	1952	3	-92.7	0.70	Intensa
1955	1956	2	-101.9	0.77	Intensa
1960	1960	1	-16.8	0.13	Ligera
1962	1963	2	-80.7	0.61	Intensa
1965	1970	6	-121.2	0.91	Intensa
1977	1977	1	-7.4	0.06	Ligera
1979	1979	1	-1.5	0.01	Ligera
1982	1985	4	-125.7	0.95	Intensa
1989	1989	1	-12.9	0.10	Ligera
1994	2006	13	-132.8	1.00	Extraordinaria

Cuadro 13. Períodos de sequía hidrológica en la presa Venustiano Carranza.

Año		Duración	Severidad	Severidad relativa	Tipo de sequía
Inicial	Final	Número de años	hm ³		
1940	1940	1	-37.5	0.03	Ligera
1942	1943	2	-158.7	0.14	Ligera
1945	1945	1	-42.8	0.04	Ligera
1950	1957	8	-1098.1	1.00	Extraordinaria
1962	1966	5	-572.4	0.52	Intensa
1968	1969	2	-97.0	0.09	Ligera
1977	1977	1	-44.3	0.04	Ligera
1982	1985	4	-608.7	0.55	Intensa
1989	1989	1	-128.5	0.12	Ligera
1994	2006	13	-602.6	0.55	Intensa
2011	2012	2	-225.0	0.20	Ligera

Cuadro 14. Períodos de sequía hidrológica en la presa Falcón.

Año		Duración	Severidad	Severidad relativa	Tipo de sequía
Inicial	Final	Número de años	hm ³		
1968	1970	3	-438.3	0.24	Ligera
1982	1984	3	-447.5	0.24	Ligera
1989	1989	1	-172.6	0.09	Ligera
1991	1991	1	-122.1	0.07	Ligera
1993	2002	10	-1843.8	1.00	Extraordinaria
2006	2006	1	-178.2	0.10	Ligera
2009	2009	1	-198.2	0.11	Ligera
2011	2012	2	-300.3	0.16	Ligera

Se considera que, en la mayor parte de la cuenca, el período de sequía extraordinaria se extendió prácticamente a lo largo de 14 años (1992-2005), y fue el más severo y prolongado del cual se tiene registro. Como consecuencia de lo anterior, el volumen de agua anual utilizado para irrigación en los distritos de riego ubicados en la sección mexicana de la cuenca (005 Delicias, 090 Bajo Río Conchos y 103 Río Florido, Chih.; 004 Don Marín, Coahuila-Nuevo León, y 025 Bajo Río Bravo, Tamaulipas), disminuyó considerablemente: durante el periodo de 1993-2005, se utilizaron en promedio 1586 hm³ de agua para riego, lo cual representó el 64% de lo que normalmente se empleó en el período de 1940-1992 (2,478 hm³). Esta situación ocasionó que disminuyera sensiblemente la superficie anual cultivada en dichos distritos de riego: en el período 1993-2005 se regaron en promedio 189 710 hectáreas, lo cual representó el 61% de la superficie histórica irrigada hasta el año de 1992 (308 537 hectáreas). La sequía extraordinaria también afectó las entregas de agua del río Bravo que nuestro país realiza a los Estados Unidos de acuerdo con el Tratado Internacional de 1944, ya que en el período de 1993-2005 solamente se pudo entregar en promedio el 60% de los 432 hm³ que se establecen en el Tratado como valor medio anual. Así, desde principios de los años noventas, México empezó a acumular un déficit en la entrega de aguas del río Bravo a los Estados Unidos y, conforme a los acuerdos de ambos gobiernos para reducir el déficit, éste se cubrió parcialmente a principios de la década pasada y se saldó por completo en el año 2010; pero los incumplimientos en el pago de los adeudos correspondientes al nuevo ciclo de cinco años siguen vigentes ante la situación de la actual sequía que se vive desde el año 2011 en todo el norte del país.

Según la CONAGUA (2012), para enfrentar en mejores condiciones los efectos de la sequía, tanto los usuarios como las autoridades estatales y federales han acordado los siguientes principios fundamentales: 1) que las cuencas de los ríos Conchos y Bravo se manejen en forma integral y no de manera independiente, como se han venido manejando; 2) se ha establecido también que la prioridad es seguir garantizando el suministro de agua potable a las ciudades mexicanas que se abastecen del río Bravo (Reynosa, Nuevo Laredo, Matamoros, Ciudad Acuña, etc.), cuya población asciende a más de un millón seiscientos mil habitantes; 3) otra premisa básica que se ha acordado es que todos los usuarios de la cuenca deben emplear el agua de manera más eficiente,

especialmente los usuarios de riego; para lograr este propósito, se realizó la modernización y tecnificación de los distritos de riego 005 Delicias, 090 Bajo Río Conchos y 103 Río Florido, Chih.; y se encuentran en proceso de modernización los distritos 004 Don Martín, Coahuila-Nuevo León, y 025 Bajo Río Bravo, Tam. De acuerdo con la propia dependencia federal, se estima que la tecnificación y modernización tendrá un efecto directo en la eficiencia del uso del agua que pasará del 33 al 53% y significará un volumen ahorrado de 555 hm³ en un ciclo de cinco años, considerando un escenario de sequía; con un escenario más favorable, los volúmenes recuperados serían del orden de los 1207 hm³ en un período de cinco años. Los volúmenes ahorrados serán distribuidos entre el resto de los usuarios de la cuenca, lo que posibilitará atender en mejor forma las necesidades de las ciudades mexicanas de la frontera que se abastecen del río Bravo, de los usuarios de la parte baja de la cuenca y los compromisos contenidos en el Tratado de 1944.

Sin embargo, las acciones estructurales son insuficientes en la práctica para incrementar la eficiencia en el uso del agua y lograr la sustentabilidad del recurso ante la presencia de sequías recurrentes, dado que en la gestión del agua en cualquier cuenca o sistema hidráulico intervienen diversos factores (sociales, culturales, normativos y reglamentarios) que juegan un rol determinante y que, por lo tanto, no deberían ser ignorados (Linares, 2004; Escobedo y Pérez, 2010; Ortega-Gaucin, 2012). Por ello, ante la imposibilidad de incrementar la oferta del recurso hídrico debido a la baja disponibilidad natural en la cuenca y al elevado costo económico y ambiental de importar agua de otras regiones, las principales acciones necesarias para el futuro deberán encaminarse hacia el manejo de la demanda, por lo que se deberá racionalizar el agua en los distintos usos. Para lograrlo, es fundamental e imperativo poner en marcha las siguientes acciones: 1) es muy importante que se hagan respetar las vedas establecidas desde 1953 para el aprovechamiento de las aguas superficiales provenientes de los tributarios del río Bravo; 2) se debe analizar la conveniencia de modificar los Títulos de Concesión de Aguas Nacionales que tienen actualmente los usuarios de riego de la cuenca, debido a que el parámetro utilizado por la CONAGUA para la determinación de los volúmenes concesionados de las presas de almacenamiento fue el valor de la media aritmética de las extracciones de agua; sin embargo, como muestran los resultados obtenidos en este trabajo,

en la práctica es muy poco probable que ocurran las aportaciones medias; 3) se deben definir y aplicar políticas adecuadas para la operación de las presas de almacenamiento que optimicen el manejo del agua en función de los escurrimientos que se presentaron en el año previo, el volumen de agua almacenado y la probabilidad de ocurrencia de futuros escurrimientos; y 4) es urgente que se autorice y aplique el reglamento para el uso, aprovechamiento y distribución de las aguas superficiales en la cuenca, con el fin de lograr un manejo integral, ordenado y equitativo del vital líquido; la autorización de dicho reglamento se ha venido postergando desde hace más de una década debido a la falta de acuerdos y consensos entre los usuarios agrícolas de las partes alta y baja de la cuenca, lo cual es un indicativo de los conflictos sociopolíticos que se han suscitado por el uso del agua, desde hace ya varios años, en esta región del país.

CONCLUSIONES

El estudio de las aportaciones de agua que ingresan a las presas de almacenamiento ubicadas en la sección mexicana de la cuenca del río Bravo, es útil para analizar y caracterizar apropiadamente los períodos de sequía hidrológica registrados históricamente en la cuenca, y permite constatar que la sequía es un problema persistente en esta región del país. En la mayor parte de la cuenca ocurrió un período de sequía hidrológica extraordinaria que se extendió prácticamente a lo largo de 14 años (1992-2005), y fue el más severo y prolongado del cual se tiene registro. Esta sequía tuvo importantes repercusiones en la disponibilidad de agua para los distintos usos, y afectó severamente la producción agrícola de los distritos de riego que se ubican en la cuenca, además de que provocó que se incumplieran cabalmente las entregas anuales de agua que México debe hacer a Estados Unidos de acuerdo con el Tratado Internacional signado por ambas naciones en 1944. Por ello, frente al elevado porcentaje de déficit hídrico en cada período de sequía, y la frecuencia con que éstos se presentan, es importante que las directrices sobre el manejo del agua se basen en las probabilidades reales de menor disponibilidad y no en las condiciones de aparente abundancia. Las acciones estructurales que han sido implementadas para hacer un uso eficiente del agua (en los distritos de riego, principalmente) deben ser complementadas con acciones no estructurales que

permitan hacer una gestión integral del recurso, con base en la adecuación y vigilancia estricta del cumplimiento de normas y reglamentos que rigen el uso del agua y, en su caso, mediante la aplicación de sanciones por su inobservancia. Sólo de esa manera se estará en condiciones de reducir los impactos de las sequías, disminuir la vulnerabilidad de los usuarios ante este fenómeno, y cubrir los adeudos de agua que México tiene con Estados Unidos de América según el Tratado de 1944.

LITERATURA CITADA

- Barakat, F. and A. Handoufe. 1998. Approche agroclimatique de la sécheresse agricole au Maroc. *Sécheresse* 9: 201-208.
- Bergaoui, M. and A. Alouini. 2001. Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique: Cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. *Sécheresse* 12: 205-213.
- Bootsma, A. J. B., R. J. Boisvert, and W. Baier. 1996. La sécheresse et l'agriculture canadienne: une revue des moyens d'action. *Sécheresse* 7: 277-285.
- Bordi, I. and A. Sutera. 2007. Drought monitoring and forecasting at large scale. pp: 3-27. *In: G. Rossi, T. Vega, and B. Brunella (eds.). Methods and tools for drought analysis and management.* Springer. Dordrecht, The Netherlands.
- CILA (Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos de América). 2005. Cumbre binacional del río Bravo. Documento base, CILA. McAllen, Texas, USA.
- CILA (Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos de América). 2008. Informe anual 2008. Cd. Juárez, Chihuahua, México.
- CILA (Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos de América). 2011. Cumbre binacional de saneamiento fronterizo y calidad del agua. Documento base, CILA. San Antonio, Texas, USA.
- CILA (Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos de América). 2012. Cumbre binacional de recursos hídricos en la frontera. Documento base, CILA. Cd. Juárez, Chihuahua, México.
- COLPOS (Colegio de Postgraduados). 2008. Estudio y balance sobre la disponibilidad y demanda de agua en el río Bravo. Asociaciones de Usuarios del Distrito de Riego Bajo Río Bravo. Reynosa, Tamaulipas, México.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2012. La cuenca del río Bravo y el Tratado Internacional de Aguas de 1944. CONAGUA. México, D.F.
- Escobedo S., J. L., and R. H. Pérez E. 2010. Distribution of the Waters of the Rio Grande between Mexico and the United States in the Fort Quitman-Ciudad Juarez Area. *Frontera Norte* 22:133-160.
- Florescano, E. 2000. Breve historia de la sequía en México. Conaculta. México, D. F.
- Fournier, J. M. 2001. L'eau dans les villes d'Amérique Latine – Inégalités sociales et concurrences des usages. *Géographie Sociale.* Paris, Francia.

- Gill, R. B. 2008. Las grandes sequías mayas: Agua, vida y muerte. Fondo de Cultura Económica. México, D. F.
- Hidore, J. J. 1996. Global environmental change: It's nature and impact. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Lehmann, E. L. and J. P. Romano. 1986. Testing statistical hypotheses. Springer. New York, NY, USA.
- Linares, M. 2004. La sequía en la cuenca del río Bravo: principios de política. *Gaceta Ecol.* 70: 57-66.
- Nalbantis, I. 2008. Evaluation of a hydrological drought index. *Eur. Water* 23/24: 67-77.
- McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. pp. 233-236. *In: 8th Conference on Applied Climatology.* American Meteorological Society. Anaheim, CA, USA.
- Ortega-Gaucin, D., E. Mejía, E. Palacios, and L. Rendón. 2009. Modelo de optimización de recursos para un distrito de riego. *Terra Latinoamericana* 27: 219-226.
- Ortega-Gaucin, D. 2012. Impacto socio-económico de la sequía en un distrito de riego: estrategias para mitigarlo. Editorial Académica Española. Saarbrücken, Alemania.
- Seavoy, R. E. 1986. Famine in peasant societies. Greenwood Press. New York, NY, USA.
- Velasco, I., L. Ochoa y C. Gutiérrez. 2005. Sequía, un problema de perspectiva y gestión. *Reg. Soc.* 17: 35-71.
- Wilhite, D. A. and M. H. Glantz. 1985. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water Internat.* 10: 111-120.
- Wilhite, D. A. 1991. Drought planning: A process for State Government. *Water Resour. Bull.* 27: 29-38.
- Wilhite, D. A. 2000. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. pp. 1-18. *In: D. Wilhite (ed.). Drought: A global assessment, Vol. I.* Routledge, NY, USA.