



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

**USOS DE LA INFORMACIÓN CLIMÁTICA EN LA
GESTIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUÍAS**

T E S I S

que para optar por el grado de

DOCTORADO EN CIENCIAS

presenta

CAROLINA NERI VIDAURRI

Director de tesis:

Dr. Víctor O. Magaña Rueda

Instituto de Geografía

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO DE 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A Ivan,



Marina y Sol

Esta investigación fue apoyada por:

- El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) a través del Programa de Apoyo a estudios de Posgrado.
- La Dirección General de estudios de Posgrado.
- El Proyecto de investigación CONACYT-SEMARNAT-2008-1-107997. Coordinado por el Dr. Víctor Magaña, Instituto de Geografía.
- El Proyecto de investigación CONACYT-INEGI-209932. Coordinado por el Dr. Víctor Magaña, Instituto de Geografía.
- El Proyecto de investigación de la Dirección General de Apoyo a Proyectos Académicos (DGAPA-PAPIIT, UNAM); clave IN106815. Coordinado por el Dr. Víctor Magaña, Instituto de Geografía.

Agradecimientos

A Víctor por su tiempo e interés en el desarrollo y culminación de esta tesis, en particular por enseñarme a pensar de una forma no convencional y siempre buscar alternativas.

A los miembros del jurado de examen, la Dra. María Engracia Hernández, el Dr. Oscar Escolero, el Dr. Víctor Mendoza y el Dr. Agustín Breña por su atención en la revisión de esta tesis. Sin duda, sus comentarios y sugerencias mejoraron la calidad de la misma y motivaron discusiones interesantes para futuros trabajos.

A los miembros de mi comité revisor, al Dr. José Luis Moreno, al Dr. Lorenzo Vázquez y el Dr. Agustín Breña por su apoyo a lo largo del desarrollo de la investigación.

A la Dra. Margaret Wilder y al Dr. Gregg Garfin por la oportunidad de realizar una estancia en la Universidad de Arizona y compartir sus conocimientos enfocados en la participación social y los procesos de toma de decisiones.

Al Dr. Brad Lyon por su apoyo durante mi estancia en el IRI y sus enseñanzas e interés en el uso de información climática en México.

Al Dr. Cuauhtémoc León, al Dr. Fernando Briones, a la Dra. Leticia Gómez, a la Dra. Teresa Reyna y al Dr. Ernesto Caetano por estar presentes en este proceso; su apoyo y consejos marcaron pautas esenciales en mi investigación. A la Dra. Megan Melamed y la Dra. Brenda Ávila, por su tiempo y revisiones. A todos, gracias por su amistad invaluable.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, al Centro de Ciencias de la Atmósfera y al Instituto de Geografía por brindarme un espacio para desarrollarme profesional y personalmente.

A la CONAGUA y al INECC por la oportunidad de participar en proyectos y llevar más allá del gabinete, las experiencias y resultados asociados a este trabajo.

A mis compañeros: Christian, Eduardo, Emmanuel, Luis, Clemente, Armenia, Gustavo y Violeta por compartir sus trabajos y hacer el proceso llevadero.

A mis padres y mi hermana, por su cariño y comprensión en todo momento.

A Erandi, mi amiga del alma.

ÍNDICE

Resumen	1
Abstract	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Las sequías y sus impactos en México	3
1.2 Índices de la sequía e impactos	11
1.3 La gestión integral del riesgo ante sequías y el uso de la información climática	14
1.4 Vulnerabilidad y riesgo: bases teórico-conceptuales	17
1.5 Objetivos	23
2. METODOLOGÍA Y DATOS	24
2.1 El uso de indicadores para evaluar vulnerabilidad y riesgo	24
2.2 Descripción de datos	26
3. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y EL RIESGO ANTE SEQUÍAS EN MÉXICO	28
3.1 Propuesta metodológica	28
3.2. Aplicación de la metodología	33
3.2.1 Etapa 1: Caracterización de la vulnerabilidad	33
3.2.2 Etapa 2: Estimación de la vulnerabilidad	57
3.3.3 Etapa 3. Cuantificación del riesgo	69
3.3.4 Etapa 4. Validación del modelo de riesgo ante sequías meteorológicas	73
4. LA SEQUÍA COMO UN PROBLEMA DE GESTIÓN PARA LA PREVENCIÓN DEL RIESGO	86
5. CONCLUSIONES	92
6. ANEXO I. DATOS	96
7. ANEXO II. PUBLICACIÓN	105
8. REFERENCIAS	121

ÍNDICE DE FIGURAS

	<i>Pág.</i>
<i>Figura 1. SPI – 6 promedio para el estado de Chihuahua (100W-106W, 25N-33N) donde se muestran los periodos de sequía alrededor del 1980 y del 2016.</i>	5
<i>Figura 2. Evolución de la sequía a través del índice estandarizado de precipitación (SPI-12) de noviembre de 2010 a enero de 2012.</i>	6
<i>Figura 3. Resumen de los impactos de la sequía 2011.</i>	10
<i>Figura 4. Nivel de agregación de la información para la construcción de índices a partir de indicadores y de datos crudos.</i>	25
<i>Figura 5. Regiones Hidrológico Administrativas (RHAs) de CONAGUA.</i>	29
<i>Figura 6. Diagrama de cambios en el tiempo del riesgo climático (línea negra) como consecuencia de la tendencia de: a) la vulnerabilidad (línea roja), b) el</i>	33
<i>Figura 7. Metodología para estimar la vulnerabilidad y riesgo ante sequías.</i>	33
<i>Figura 8. Índice compuesto de vulnerabilidad del sector hídrico (en 2002 y 2014) ante Sequías.</i>	59
<i>Figura 9. Índice de vulnerabilidad para la RHA I.</i>	60
<i>Figura 10. Índice de vulnerabilidad para la RHA II.</i>	61
<i>Figura 11. Índice de vulnerabilidad para la RHA III.</i>	62
<i>Figura 12. Índice de vulnerabilidad para la RHA IV.</i>	62
<i>Figura 13. Índice de vulnerabilidad para la RHA V.</i>	63
<i>Figura 14. Índice de vulnerabilidad para la RHA VI.</i>	64
<i>Figura 15. Índice de vulnerabilidad para la RHA VII.</i>	64
<i>Figura 16. Índice de vulnerabilidad para la RHA VIII.</i>	65
<i>Figura 17. Índice de vulnerabilidad para la RHA IX.</i>	66
<i>Figura 18. Índice de vulnerabilidad para la RHA X.</i>	66
<i>Figura 19. Índice de vulnerabilidad para la RHA XI.</i>	67
<i>Figura 20. Índice de vulnerabilidad para la RHA XII.</i>	68
<i>Figura 21. Índice de vulnerabilidad para la RHA XIII.</i>	68
<i>Figura 22. SPI-12 para las RHAs de norte para el periodo de 2001 al 2012.</i>	70
<i>Figura 23. Índice de riesgo ante sequías para las RHAs del centro-sur.</i>	72
<i>Figura 24. Índice de riesgo ante sequías para las RHAs del norte.</i>	72
<i>Figura 25. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en la RHA VI Río Bravo entre 2002 y 2014.</i>	74

<i>Figura 26. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en la RHA VII Cuencas Centrales del Norte entre 2002 y 2014.</i>	75
<i>Figura 27. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en la RHA IV Balsas entre 2002 y 2014.</i>	75
<i>Figura 28. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en la RHA VIII Lerma Santiago Pacífico entre 2002 y 2014.</i>	76
<i>Figura 29. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en la RHA V Pacífico Sur entre 2002 y 2014.</i>	76
<i>Figura 30. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en la RHA X Golfo Sur entre 2002 y 2014.</i>	77
<i>Figura 31. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en RHA XII Península de Yucatán entre 2002 y 2014.</i>	77
<i>Figura 32. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en RHA I Península de baja California entre 2002</i>	78
<i>Figura 33. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en RHA III Pacífico Norte entre 2002 y 2014.</i>	78
<i>Figura 34. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en RHA II Noroeste entre 2002 y 2014.</i>	79
<i>Figura 35. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en RHA IX Golfo Norte entre 2002 y 2014.</i>	79
<i>Figura 36. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en RHA XIII Valle de México y Sistema Cutzamala entre 2002 y 2014.</i>	80
<i>Figura 37. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en RHA XI Frontera Sur entre 2002 y 2014.</i>	80
<i>Figura 38. Índice de riesgo y almacenamiento de agua en la RHA VI Río Bravo entre 2002 y 2012.</i>	81
<i>Figura 39. Índice de riesgo y almacenamiento de agua en la RHA IX Golfo Norte entre 2002 y 2012.</i>	82
<i>Figura 40. Índice de riesgo y almacenamiento de agua en la RHA II Noroeste entre 2002 y 2012.</i>	82
<i>Figura 41. Índice de riesgo y almacenamiento de agua en la RHA VIII Lerma Santiago Pacífico entre 2002 y 2012.</i>	83

<i>Figura 42. Índice de riesgo y almacenamiento de agua en la RHA III Pacífico Norte entre 2002 y 2012.</i>	83
<i>Figura 43. Índice de riesgo y almacenamiento de agua en la RHA X Golfo Centro entre 2002 y 2012.</i>	84
<i>Figura 44. Ciclo de impactos ante sequía en Sonora 1998-2000.</i>	88

ÍNDICE DE TABLAS

	<i>Pág.</i>
<i>Tabla 1. Detalles de los impactos de las sequías en el 2010-2012 por Estado.</i>	7
<i>Tabla 2. Roles de la vulnerabilidad.</i>	20
<i>Tabla 3. Principales datos por RHA.</i>	34
<i>Tabla 4. Indicadores de vulnerabilidad de las RHAs ante sequías.</i>	58
<i>Tabla 5. Evolución entre 2002 y 2014 del índice promedio de vulnerabilidad a la sequía en las 13 RHAs.</i>	60
<i>Tabla 6. Cantidad de precipitación que daría lugar a la insuficiencia de agua disponible para las actividades socioeconómicas y los requisitos ambientales.</i>	70
<i>Tabla 7. Valores de SPI-12 normalizados para las RHAs en el periodo de 2002-2014.</i>	71
<i>Tabla 8. Índice de riesgo por RHA para el periodo de 2002-2014.</i>	72
<i>Tabla 9. Coeficiente de correlación entre el riesgo y las área siniestradas para las RHAs.</i>	73
<i>Tabla 10. Coeficiente de correlación entre el riesgo y almacenamiento en presas en las RHAs.</i>	81
<i>Tabla 11. Datos normalizados del indicador GP.</i>	96
<i>Tabla 12. Datos sin normalizar del indicador GP.</i>	96
<i>Tabla 13. Agua renovable media (Hm³/año).</i>	96
<i>Tabla 14. Volumen total de agua concesionado (Hm³/año).</i>	97
<i>Tabla 15. Datos normalizados del indicador AC.</i>	97
<i>Tabla 16. Número total de acuíferos.</i>	97
<i>Tabla 17. Número total de acuíferos sobreexplotados.</i>	98
<i>Tabla 18. Número total de acuíferos con intrusión salina.</i>	98
<i>Tabla 19. Datos normalizados del indicador AT.</i>	98
<i>Tabla 20. Volumen de agua pública residual tratada (m³/s).</i>	99
<i>Tabla 21. Volumen de agua concesionada para abastecimiento público</i>	99

<i>Tabla 22. Datos normalizados para el indicador TO.</i>	99
<i>Tabla 23. Tarifas de agua para uso domestico tipo residencial.</i>	100
<i>Tabla 24. Ciudades representativas para el impacto de la sequía agrícola por RHA.</i>	100
<i>Tabla 25. Datos normalizados para el indicador PA.</i>	100
<i>Tabla 26. Datos sin normalizar para el indicador PA.</i>	101
<i>Tabla 27. Producción (Miles de Ton).</i>	101
<i>Tabla 28. Volumen total de agua distribuida (Miles de m³).</i>	101
<i>Tabla 29. Precio Medio Rural (\$/Ton).</i>	102
<i>Tabla 30. Datos normalizados para el indicador AP.</i>	102
<i>Tabla 31. Datos sin normalizar para el indicador AP.</i>	102
<i>Tabla 32. Porcentaje de agua almacenada en presas principales.</i>	103
<i>Tabla 33. Datos por RHA relacionados al indicador PA.</i>	103
<i>Tabla 34. SPI sin normalizar.</i>	103
<i>Tabla 35. Porcentaje de superficie agrícola afectada.</i>	104
<i>Tabla 36. Superficie siniestrada (ha).</i>	104
<i>Tabla 37. Anomalía del porcentaje de agua almacenada en presas</i>	104

RESUMEN

Las sequías meteorológicas afectan severamente a los sectores económicos, sociales y ambientales en México. Recientemente, los esfuerzos para reducir sus impactos se han enfocado en monitorear y evaluar el fenómeno climático y definir acciones para actuar antes, durante y después de su ocurrencia. El presente estudio propone una metodología para estimar la vulnerabilidad y el riesgo a la sequía, teniendo en cuenta los factores físicos, económicos y sociales que conforman las Regiones Hidrológicas-Administrativas (RHAs) de México propensas a experimentar sequías hidrológicas y agrícolas. Reconociendo que no hay una forma única para evaluar la vulnerabilidad, se propone un método que define los factores de la vulnerabilidad a través de indicadores. Éstos se relacionan con la infraestructura de agua, el estado de los acuíferos, los niveles de tratamiento de aguas residuales, la productividad del agua en la agricultura, la infraestructura hidráulica, y las tarifas de agua. Siguiendo la metodología propuesta se desarrollo un índice de vulnerabilidad y el riesgo ante sequías para cada RHA mediante la combinación de los indicadores. El producto de la vulnerabilidad y la amenaza (falta de lluvia) resulta en estimaciones de riesgo, este es validado al comparar con datos de impactos de sequía agrícola e hidrológica. El proceso de validación es un paso importante en la metodología, ya que permite identificar las causas de los desastres a través de los factores de vulnerabilidad y a su vez conduce a las estrategias de gestión del riesgo. Los resultados muestran que a pesar de que la vulnerabilidad a la sequía meteorológica en todas las RHAs ha disminuido en los últimos años, el riesgo de ser impactados por una sequía sigue siendo alto y se podría traducir en pérdidas económicas graves, como los registrados en el centro y el norte de México durante la sequía del 2011-2012.

ABSTRAC

Meteorological droughts severely affect the economic, social and environmental sectors in Mexico. Recently, efforts to reduce its impacts have focused on monitoring and evaluating the climate phenomenon and defining actions to take before, during and after its occurrence. The present study proposes a methodology to estimate vulnerability and risk to drought, taking into account the physical, economic and social factors that make up the Hydrological-Administrative Regions (RHAs) of Mexico prone to hydrological and agricultural droughts. Recognizing that there is no single way to assess vulnerability, a method is proposed that defines vulnerability factors through indicators. These relate to water infrastructure, aquifer status, wastewater treatment levels, agricultural water productivity, hydraulic infrastructure, and water rates. Following the proposed methodology, a vulnerability index and drought risk for each RHA were developed by combining the indicators. The product of vulnerability and threat (lack of rainfall) results in risk estimates, which is validated when comparing data from agricultural and hydrological drought impacts. The validation process is an important step in the methodology, as it allows identifying the causes of disasters through vulnerability factors and in turn leads to risk management strategies. The results show that although vulnerability to meteorological drought in all RHAs has decreased in recent years, the risk of being impacted by a drought remains high and could lead to severe economic losses, such as those recorded in the Center and northern Mexico during the drought of 2011-2012.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Las sequías y sus impactos en México

Las sequías son reconocidas como uno de los fenómenos climáticos que conllevan costosas pérdidas a la sociedad, sus actividades productivas y a los ecosistemas (UNISDR, 2011; 2013). De forma general, se habla de sequía como un periodo con precipitación escasa o anormalmente baja que genera escasez en la disponibilidad de agua para el desarrollo de diversas actividades socioeconómicas o estrés hídrico en la vegetación (WMO, 1986; NDMC, 2004).

La sequía se puede presentar en todas las regiones del planeta bajo cualquier régimen climático, ya que es un rasgo normal y recurrente de la variabilidad climática. Sin embargo, su duración, magnitud e intensidad, y por tanto, sus impactos varían de forma significativa de una región a otra. Por lo anterior, resulta necesario caracterizar cada región expuesta a la sequía, señalando de aquella en donde la precipitación es sistemáticamente baja y la evapotranspiración es a alta, es decir, de las regiones áridas (WMO, 1975).

Los daños derivados de la sequía comprenden impactos directos a los sistemas sociales, tales como: hambrunas, migración, abandono de tierras por falta de agua para riego, y pérdidas de cultivos y de ganado, así como reducción de la disponibilidad de agua para uso doméstico e industrial, o para la generación de energía. También induce condiciones propicias para incendios forestales, alteraciones en la distribución de especies, pérdida de biodiversidad, e incluso, aumento en conflictos sociales y políticos. Frecuentemente, factores como la pobreza, el manejo inadecuado de los recursos naturales (ej. agua, suelo, ecosistemas), una mala planeación urbana, falta de gobernanza y otros elementos relacionados a socioecosistemas vulnerables contribuyen a que la sequía se convierta en desastre.

Son diversos los sectores socioeconómicos en México que se han visto afectados por periodos de sequías a lo largo de la historia (Castorena *et al.*, 1980; García, 1993; Florescano y Swan, 1995; Reyes, 1997; García *et al.*, 2003; Contreras, 2005; Mendoza *et al.*, 2006). Se habla de México como muy vulnerable a la sequía por ser un país en vías de desarrollo, y que las principales afectaciones que experimenta por dicha condición son sinónimo de crisis alimentarias. Si bien, el sector agropecuario es uno de los sectores económicos más afectados por la disminución en la precipitación,

no siempre se llega a crisis alimentarias. Por ejemplo, durante la sequía ocurrida en 1997 se realizaron importaciones adicionales de granos con un costo de \$1,300 millones de dólares debido a la disminución de producción nacional (Magaña, 1999).

La diversidad de impactos en los que se traduce la disminución en las lluvias requieren un tratamiento desde el punto de vista del riesgo. Así, los impactos de la sequía son resultado de la interacción de la frecuencia, severidad y del grado espacial del fenómeno climático (la sequía) y del grado de vulnerabilidad de la población o sector afectado. En las últimas décadas los costos y pérdidas asociadas a las sequías se han incrementado. Por ello, algunos sugieren que esta condición se está volviendo más frecuente, más larga e intensa (Mishra and Singh, 2010). Sin embargo, cuando se habla de los impactos de la sequía poco se dice de la vulnerabilidad y de las estrategias de manejo del riesgo.

En el caso de México, los efectos de las sequías están fuertemente relacionados con la situación de los recursos hídricos, pues la mayoría de las fuentes de agua se encuentran bajo una presión alta por el incremento en las demandas y la insuficiente gestión del recurso. Pese a las acciones que el gobierno mexicano ha implementado para enfrentar los impactos de las sequías, así como los programas enfocados a fortalecer la agricultura y hacer más eficiente el manejo del recurso hídrico, los costos económicos, sociales y ambientales de las sequías son cada vez mayores. Tal fue el caso de la sequía del 2010-2012, la cual puso de manifiesto la gran vulnerabilidad del país a dicha condición climática. La sequía del 2010-2012 afectó el sur de los Estados Unidos de América (EUA) y el centro-norte de México, ocasionando que las indemnizaciones por seguros agrícolas en EUA ascendieran a \$16 billones de dólares (Folger *et al.*, 2013) relacionadas con la disminución en la producción de maíz y soja, lo cual originó que la producción mundial de cereales cayera con repercusiones en los precios de los alimentos a nivel mundial (UNISDR, 2013). En México, el Gobierno Federal respondió con diversos programas y un cuantioso fondo para hacer frente a la situación de emergencia. Los impactos tuvieron costos de \$7,750.5 millones de pesos en 2011 (CENAPRED, 2013) y \$489.9 millones de pesos en 2012 (CENAPRED, 2014).

La sequía del 2010-2012

Una de las formas para analizar los déficits de precipitación en múltiples escalas de tiempo (1, 3, 6, 12, y 48 meses), es a través del Índice Estandarizado de Precipitación, SPI por sus siglas en inglés (Keyantash and Dracup, 2002). Valores positivos SPI

(negativos) indican precipitación por encima (debajo) de la media histórica. Las escalas de tiempo corresponde al interés de análisis: SPI-1 refleja las condiciones a corto plazo y cuya aplicación puede estar relacionado a la humedad del suelo; SPI-3 provee una estimación estacional de la precipitación; el SPI-6 y SPI-9 indican tendencias a mediano plazo en los patrones de precipitación; SPI-12 refleja los patrones de precipitación a largo plazo, usualmente relacionado a caudales de ríos, niveles de almacenamiento en presas, etc.; SPI-24 captura la variabilidad de baja frecuencia, evitando el ciclo anual explícito (Méndez, 2010). La sequía del 2010-2012 no fue una de las más prolongadas que ha afectado al país pues ha habido otras más intensas o prolongadas en la década de los 1930s, 1950s y 1990s (Magaña y Neri, 2012), sin embargo, ésta se caracterizó por ser una de las más intensas en el centro norte de México (Fig. 1).

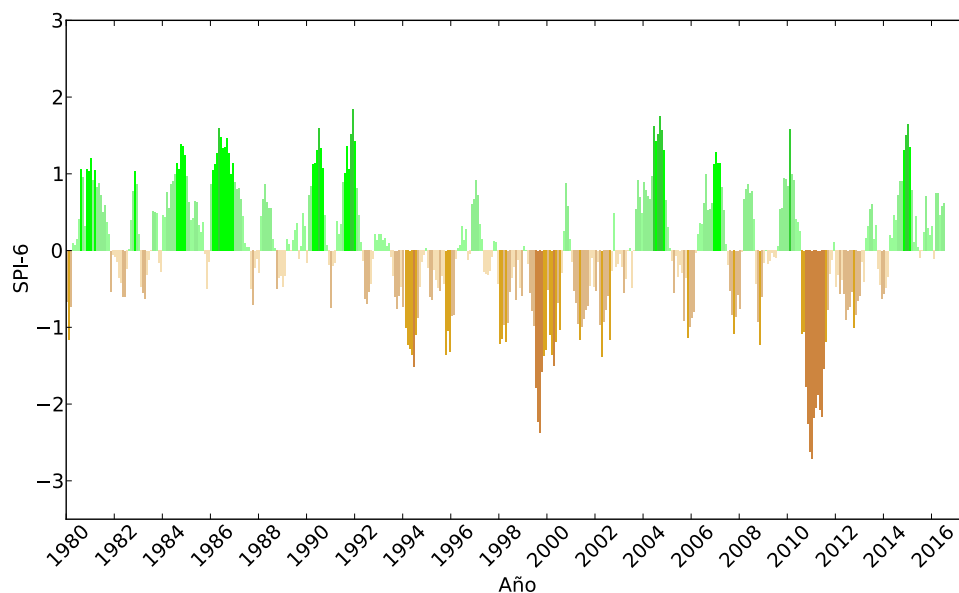


Figura 1. SPI-6 para el estado de Chihuahua (100W-106W, 25N-33N) donde se muestra, durante el periodo 1980-2016, las sequías (valores negativos) asociadas a tendencias de mediano plazo en los patrones de precipitación. Fuente: IRI, 2016a.

Después de un invierno 2010-2011 con anomalías de precipitación por debajo del promedio histórico en la mayor parte del territorio, que correspondieron a las condiciones predominantes del fenómeno la Niña, las consecuencias más severas de la sequía se presentaron en el verano del 2011, donde 86% del territorio nacional se vio afectado, particularmente los estados del centro y norte del país (SMN, 2011) (Fig. 2). Como resultado de las lluvias ocurridas a finales del 2011, las áreas afectadas con sequía se redujeron. Sin embargo, a principios del 2012 las condiciones meteorológicas cambiaron hacia un Niño Oscilación del Sur-Neutral (periodo de transición entre las condiciones Niña-Niño), ocasionando lluvias arriba del promedio

histórico en el Golfo de México y sureste del país, pero en los estados del centro y norte las lluvias continuaban siendo escasas. No es sino hasta la segunda mitad del 2012 que las lluvias en el norte de México comenzaron a regularizarse.

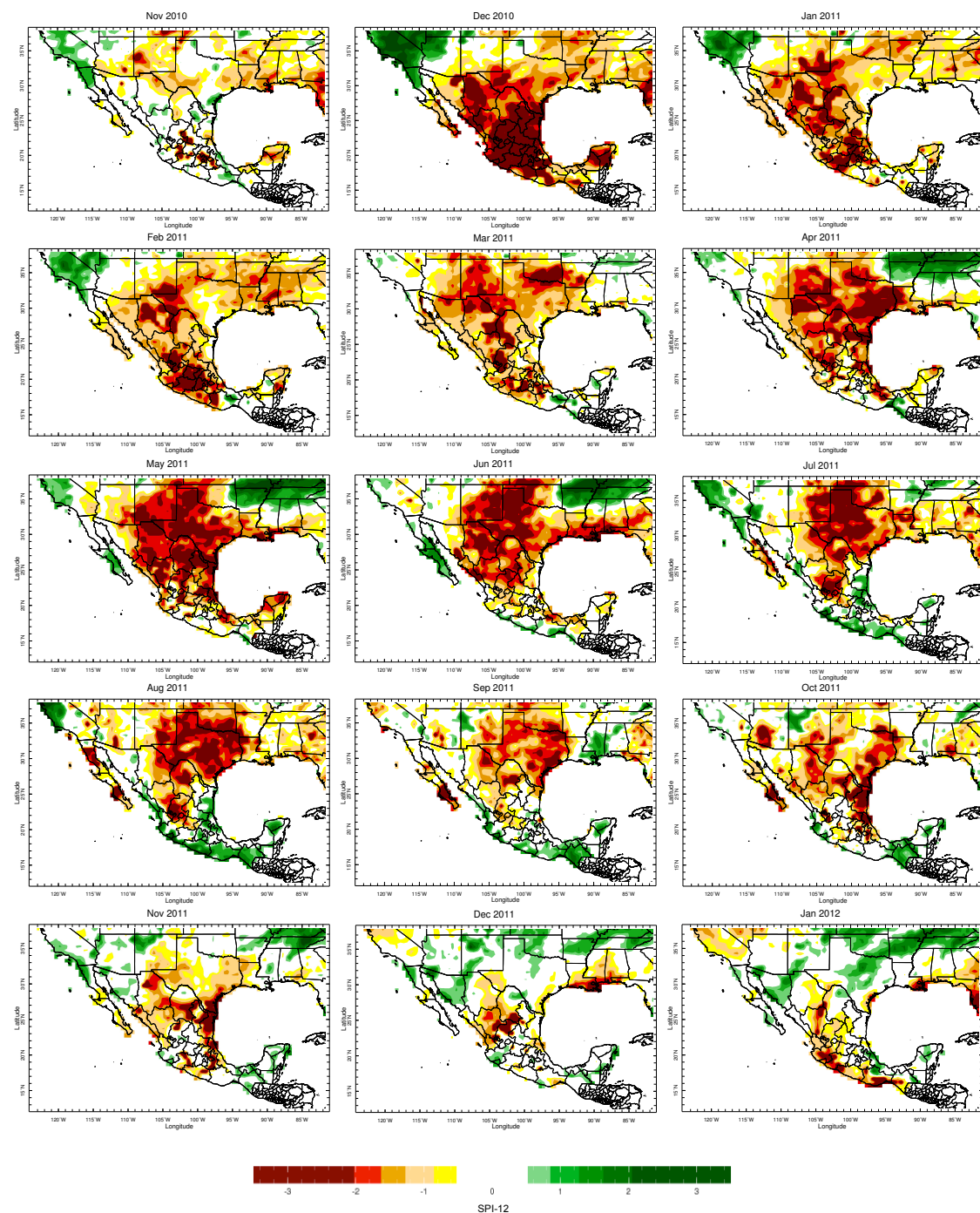


Figura 2. Evolución de la sequía a través del índice estandarizado de precipitación (SPI-12) de noviembre de 2010 a enero de 2012. Fuente: IRI, 2015.

Durante el 2011, los primeros impactos de la sequía en el centro norte de México se reflejaron en el abasto de agua potable para la población. Las acciones del gobierno, desarrolladas a través de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) y la Comisión

Nacional del Agua (CONAGUA) se enfocaron en la entrega de agua, y en la rehabilitación y construcción de pozos para uso doméstico, distribución de despensas y cobertores, y empleo temporal. Mediante el Programa Emergente de Abasto de Agua, en el caso de Durango, el estado más afectado, el agua se entregó en varias etapas, abasteciendo a más de 32,691 personas (DOF, 2012). La ganadería fue uno de los sectores más afectados, no solo por la muerte de 1,294,394 cabezas por la falta de alimento o agua, sino también por la pérdida de peso que se presentó en más del 80% del hato. En el caso del sector agrícola se reportaron 805,000 ha. perdidas (CENAPRED, 2013).

Otros efectos de las sequías que difícilmente son cuantificados, pero que significan pérdida de capital social es la migración y el deterioro del bienestar de la sociedad, como lo es la escasez de algunos productos en las zonas afectadas, el encarecimiento de productos de la canasta básica e incluso la presencia de enfermedades psicológicas (Tabla 1).

Tabla. 1. Detalles de los impactos de las sequías en el 2010-2012 por Estado. Fuente: Corporación OSSO, 2015.

Fecha	Estado	Efectos de la sequía
14/01/11	Michoacán	Al menos 200 familias afectadas por el bajo nivel del agua en el Lago de Cuitzeo producido por la sequía que los afecta desde 2010 y las altas temperaturas que han reducido la captura de peces al mínimo.
15/03/11	Durango	El estiaje prolongado hasta por 6 meses, produjo escasez de agua potable y afectó a miles de habitantes, además de que el número de incendios forestales aumentó. A algunas comunidades rurales se envió agua en pipas y se presentaron afectaciones graves a la agricultura y al sector ganadero, pues al secarse los abrevaderos, los animales perdieron peso e, incluso, murieron por deshidratación.
11/04/11	Guerrero	Reducción de la pesca hasta del 70% debido a la falta de lluvias, a lo que se sumó la escasez de peces por la pesca con métodos prohibidos y las descargas de aguas residuales de las zonas habitacionales.
12/04/11	Estado de México	Durante esa temporada de estiaje se redujo hasta en un 60% el deshielo de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, debido a las altas temperaturas, lo que disminuyó el caudal del cual se abastecen los habitantes de este municipio para su consumo y la agricultura.
17/05/11	Yucatán	La severa sequía en el estado puso en riesgo a los hatos ganaderos y murieron cerca de 12 mil reses. A pesar de que los productores se prepararon para la temporada de calor y escasez de lluvias al comprar alimentos y vacunas, hubo retraso en las precipitaciones pluviales, los pastizales no crecieron y las reses comenzaron a morir. De 4,500 ganaderos en el oriente del estado, sólo 10% tenía sistemas de riego, mientras que el resto no contaba con pivotes para regar los pastizales y así no depender de las lluvias, siendo éstos los que corren el riesgo de perder animales.
23/06/11	Nayarit	8 mil has. de mango ataulfo pérdidas
28/10/11	Estado de México	Debido a retraso de la lluvia fue difícil recuperar la inversión de cosecha de la tuna para los pequeños productores.
30/12/11	Aguascalientes	Un año sin lluvias provocó que los 11 municipios del estado hayan resultado afectados. Se dejaron de sembrar 110 mil has. de varios cultivos, entre ellas 56 mil de maíz, frijol y forrajes. La producción de manzana cayó en 35% y el precio en 50% por la mala calidad del producto. Los ganaderos tuvieron que sacrificar 5 mil reses por la falta de

		alimento y el precio de la carne se incrementó en 20%. Es la peor sequía desde 1941.
30/12/11	Baja California Sur	Declarada zona de desastre por daños a la agricultura y la ganadería. 100 mil cabezas de ganado registraron pérdida del 40% de su masa corporal y los agostaderos llegaron al 50% de su capacidad.
30/12/11	Chihuahua	475 mil has. perdidas (350 mil de maíz y 125 mil de frijol). 90% de la cosecha de frijol se perdió; de 2 mil toneladas que se cosecharon en 2010, solo se cosecharon 200 toneladas, dejando una pérdida en este rubro de 630 millones de pesos. Otros cultivos como el alfalfa y el algodón también resultaron afectados. 180 cabezas de ganado murieron (12% del total del hato ganadero). La sierra Tarahumara es la más afectada, ya que no se pudo levantar cosecha de frijol y maíz. Se dispararon los suicidios. No había agua para consumo humano; se repartieron despensas. Dentro de las actividades informales pero de importancia económica, la sequía también afectó la siembra de marihuana y amapola, lo que redujo los ingresos de cientos de pobladores. Es la peor sequía en 70 años.
30/12/11	Coahuila	12 mil reses muertas y baja del 50% en la producción de algodón. Se redujo 40% la siembra de maíz (200 mil has.), equivalente a 2 millones de toneladas.
30/12/11	Durango	18 meses sin lluvia provocaron la peor sequía en 88 años, afectando a más de 40 mil agricultores y ganaderos. 80% de la superficie agrícola perdida y 90% de las hectáreas de frijol dejaron de sembrarse que, junto con las de maíz, suman 200 mil, provocando una reducción del 50% en la siembra de granos. La falta de agua obligó a los agricultores a cambiar a cultivos de menor valor. Al menos 35 mil cabezas de ganado murieron, provocando que en algunos lugares se construyeran fosas para incinerar los animales muertos. Escaseó el agua para consumo humano, haciendo necesaria la repartición en pipas para la población de 40 municipios. La falta de granos generó una crisis alimentaria. Se registró el robo de alimentos y por lo menos 5 mil habitantes (3 mil niños y adultos mayores) presentaron desnutrición 2 meses atrás. 15% de la población del estado emigró.
30/12/11	Guanajuato	Un año de lluvias poco regulares dejó 500 mil hectáreas de temporal afectadas y miles dejaron de sembrarse, principalmente de sorgo, maíz y 80% de forraje. 15 mil cabezas de ganado murieron.
30/12/11	Hidalgo	100 mil has. de cultivos de temporal perdidas. Los ganaderos remataron sus reses y borregos hasta en 50% menos de su valor. La situación fue crítica en comunidades rurales donde se distribuyó agua en pipas. Fue la peor sequía en 60 años. En algunas comunidades se realizaron misas, bailes y rituales prehispánicos para llamar al agua.
30/12/11	Jalisco	55 mil has. de cultivos (35 mil de cultivos forrajeros) y 11,532 cabezas de ganado murieron en los municipios del norte del estado. Fue la peor sequía en 30 años.
30/12/11	Michoacán	45 mil has. de maíz y sorgo perdidas, afectando a 15 mil productores del Bajío. Daños por 600 millones de pesos.
30/12/11	Nuevo León	40 mil hectáreas de cultivos de temporal de trigo, frijol y sorgo se perdieron, así como 50 mil has. de maíz y frijol que dejaron de sembrarse. 8,140 cabezas de ganado muertas (3,700 bovinos, 3,800 caprinos y 620 reses). 20% de pérdidas en el sector agrícola y ganadero. Fue la peor sequía en 50 años. Se repartió agua en pipas y se buscó potabilizar agua de lluvia, abrevaderos o charcos para aumentar la oferta del líquido y reducir problemas gastrointestinales.
30/12/11	Puebla	Miles de hectáreas de cultivos afectadas por la sequía.
30/12/11	Querétaro	8 mil hectáreas de maíz se dejaron de sembrar. Pérdida total de al menos 50 mil has. de varios cultivos de temporal y cientos de cabezas de ganado. Fue la peor sequía en 17 años.
30/12/11	Quintana Roo	Daños a la agricultura por sequía atípica.
30/12/11	San Luis Potosí	Al menos 80 mil has. de varios cultivos se perdieron y 3 mil cabezas de ganado murieron. Se estimaron pérdidas por más de mil millones de pesos, más los 2 millones de jornales perdidos.
30/12/11	Sinaloa	Se dejó de sembrar 264 mil has. (50% de la superficie). Reducción del 26% de producción agrícola en granos, legumbres y frutas.
30/12/11	Sonora	Casi 4 millones de has. de agostadero (26% de la superficie total), se secaron por la intensa sequía y 33, 300 cabezas de ganado murieron. La sequía dura ya 9 meses.

30/12/11	Tamaulipas	Pérdidas en 300 mil toneladas de granos (sorgo y maíz). 180 mil has. de sorgo y maíz sin sembrar. La producción de cítricos se desplomó 40% (200 mil toneladas se dejaron de producir de naranja, limón y toronja). 20 mil habitantes de 17 municipios son provistos de agua por pipas, debido a que sus fuentes se secaron. 50% de los hatos ganaderos murieron o fueron vendidos a bajo precio. Hubo una situación crítica por del desabasto de maíz hasta del 30% (1 millón 200 mil toneladas menos de producción).
30/12/11	Veracruz	Cerca de 20 mil has. de cultivos agrícolas y tierras de pastoreo se han perdido por la sequía de más de 5 meses.
30/12/11	Zacatecas	16 meses sin llover. 572 mil has. de cultivos (61% de la superficie total cultivable) con pérdidas totales, más 270 mil has. de maíz y frijol dejaron de sembrarse por la prolongada sequía. De 300 mil toneladas anuales de frijol, solo se cosecharon 60 mil. 75 mil reses murieron, además de miles de cabezas de caprinos y ovinos, afectando a más de 8 mil ganaderos en forma directa; otros 60 mil ganaderos tuvieron que vender el ganado a bajo costo para evitar que los animales murieran de hambre. Se implementó un programa para bombardear las nubes y provocar la lluvia mediante 90 horas de vuelo y con una inversión de 9 millones de pesos. Se vivió una situación de crisis alimentaria, por lo que en algunos poblados comenzaron el robo de comida. En algunas comunidades rurales se da un éxodo de habitantes, al punto en que varios poblados quedaron completamente vacíos.

Durante el 2011, la Secretaría de Gobernación publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) cuatro declaratorias de desastre a consecuencia de la intensa sequía, y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) publicó 21 declaraciones de desastre. En julio de ese año, se estableció la Estrategia para la Atención de los Estados Afectados por la Sequía, a través de la cual, la SAGARPA pagó más de \$500 millones de pesos de los programas de Apoyos Directos al Campo (PROCAMPO), Producción Pecuaria Sustentable y Ordenamiento Ganadero y Apícola (PROGAN) y del Componente de Energéticos Agropecuarios (DOF, 2012).

En general, los costos totales de la sequía en el 2011 ascendieron a \$7,750.5 millones de pesos (CENAPRED, 2013). Se declararon 240 municipios en desastre y 281 municipios en contingencia climática. Los estados con impactos mayores fueron Durango, Zacatecas y Guanajuato, que en conjunto acumularon 65.7% del total de daños y pérdidas estimados (Fig. 3).

Al inicio del 2012, la sequía afectaba a 1,213 municipios de 19 entidades federativas (DOF, 2012). Sin embargo, poco a poco las condiciones normales de lluvia se iban restableciendo. En 2012, los estados más afectados fueron Coahuila, Michoacán, Chihuahua y Durango, los daños en el sector agrícola fueron de 26,848 ha. y 62,456 unidades animales pérdidas, 14,096 productores afectados; los costos totales

ascendieron a \$489.9 millones de pesos (CENAPRED, 2014). A diferencia del 2011, en este año solamente se declararon en desastre dos municipios en Chihuahua.

Para responder a los impactos de la sequía 2010-2012, el Gobierno Federal mexicano implemento el Programa Integral para la Atención de la Sequía en enero de 2012, a través del cual se desarrollaron acciones en cinco ejes: 1) mantener las capacidades productivas; 2) impulsar el manejo adecuado del agua y uso sustentable de los recursos naturales; 3) promover la activación de esquemas de aseguramiento; 4) establecer esquemas de financiamiento y 5) apoyar al empleo en las zonas afectadas, operados por distintas Secretarías: Hacienda y Crédito Público; Desarrollo Social, Comunicaciones y Transporte; Medio Ambiente y Recursos Naturales; Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación y la CONAGUA; entre otras dependencia federales. Los recursos extraordinarios enfocados en este programa ascendieron a más de \$34 mil millones de pesos (DOF, 2012).

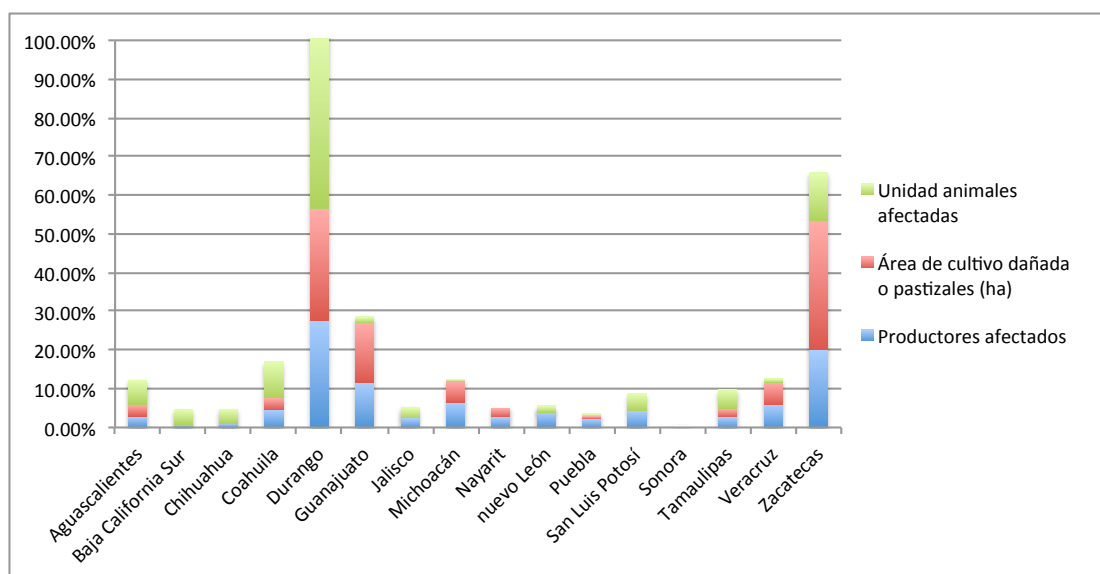


Figura 3. Resumen de los impactos de la sequía 2011. Fuente: CENAPRED, 2013.

De un análisis detallado de los factores de vulnerabilidad (Neri and Magaña, 2016) se desprende que los impactos fueron mayores como resultado de vulnerabilidades contrastantes más que por la intensidad de la sequía misma. En otras palabras, la vulnerabilidad modula la magnitud del riesgo y con ello de los impactos. Para llegar a esta conclusión es necesario analizar la magnitud de la sequía y la condición de vulnerabilidad.

1.2 Índices de la sequía e impactos

Hoy en día, uno de los grandes retos para reducir las afectaciones de la sequía es definirla y caracterizar el contexto de vulnerabilidad en que ocurren. Generalmente, las sequías han sido definidas como un déficit de precipitación, tomando en cuenta un rango establecido en cierto período de tiempo. Sin embargo, se ha comprobado en distintos casos que considerar únicamente la falta de precipitación acumulada no es suficiente para hablar de los impactos de la sequía (Neri and Magaña, 2016). En México puede suceder que un evento extremo ocurrido en un día, deje mucha lluvia y enmascare una condición de muchos días sin llover cuando esto fuera lo normal. También puede suceder que los impactos de una sequía se presenten más allá del área afectada por la falta de lluvia o que los efectos acumulativos perduren más allá de la sequía misma. Incluso puede ocurrir que la falta de agua se deba más a factores de manejo, que a una anomalía en la precipitación, lo que hace de los aspectos socioeconómicos una componente importante de lo que se percibe como sequía.

Por lo anterior, la sequía es generalmente percibida no tanto como la falta de precipitación, sino a través de los impactos asociados a la falta de agua en los que a su vez influyen otros factores como son los usos y manejo de este recurso. Así, resulta necesario separar al fenómeno climático de sus impactos. Un intento en esta dirección es la clasificación que identifica cuatro tipos de sequías (Wilhite y Glantz, 1985; AMS, 1997):

1. *Sequía meteorológica*: evaluada a partir del grado de sequedad o falta de lluvia en una región, y de la duración de dicho período seco (en comparación a una condición considerada normal). Esta definición considera específicamente las condiciones atmosféricas de la región, ya que la cantidad y distribución de la precipitación varía de una zona a otra. La sequía meteorológica es parte de la variabilidad natural del clima, aunque algunos sugieren que con el cambio climático global, la falta de precipitación por periodos prolongados es más frecuente (Dai, 2013).
2. *Sequía hidrológica*: se asocia con los efectos del déficit de precipitación en la disponibilidad de agua superficial y subterránea. Esta es medida a través de los escurrimientos y niveles en lagos, embalses y acuíferos. Las sequías hidrológicas tienden a aparecer lentamente. Por ejemplo, la deficiencia de la precipitación puede dar lugar al agotamiento rápido de la humedad del suelo,

pero el impacto de esta deficiencia en los niveles de agua subterránea puede no afectar la producción de energía hidroeléctrica en varios meses. Las causas de las sequías hidrológicas están relacionadas con los usos y manejo del agua, por lo que pueden presentarse aun sin la presencia de una sequía meteorológica.

3. *Sequía agrícola*: relacionada esencialmente con la falta de agua para los cultivos frecuentemente producido por la sequía meteorológica o hidrológica. La demanda del agua de las plantaciones depende de las condiciones atmosféricas que prevalecen en la región, así como con las características biológicas del cultivo específico, de su etapa del crecimiento y de las características físicas y biológicas del suelo. La sequía agrícola explica los impactos en los cultivos dependiendo de la susceptibilidad de éstos a la falta de humedad durante las diversas etapas de su desarrollo. Por ejemplo, un déficit de humedad en la tierra puede afectar la etapa de germinación, resultando en una reducción de la producción final.
4. *Sequía socioeconómica*: se produce cuando la disponibilidad de agua disminuye hasta el punto de producir daños (económicos o a la salud) en la población de la zona afectada por la escasez de lluvia y agua. Para hablar de sequía socioeconómica no es necesario que se produzca una restricción de consumo de agua, sino que basta con que algún sector económico se vea afectado por la escasez hídrica. La presión antrópica sobre el recurso agua hace que cada vez sea mayor la ocurrencia de sequías socioeconómicas, con pérdidas económicas crecientes, incluso en el caso de una sequía meteorológica breve.

Recientemente se ha propuesto una categoría para separar la *sequía en aguas superficiales y subterráneas* (Mishra and Singh, 2010). Si bien, la reducción del agua almacenada se relaciona con el explotación del recurso, los niveles de almacenamiento de aguas subterráneas o la recarga de acuíferos o descarga pueden ser utilizados para definir o cuantificar este tipo de sequía.

La importancia de esta última categoría puede contextualizarse con la sequía que padeció California, la cual inicio en otoño del 2011 y se agudizó en el 2014, causando la declaración de estado de emergencia y, más tarde, la aprobación de la Ley de Manejo Sustentable de Aguas Subterránea (Hanak *et al.*, 2016). De acuerdo con Hanak *et al.* (2016), uno de los sectores mayormente afectados fue el agrícola, consumidor del 80% del agua en el estado. En el 2015, los agricultores recibieron 50%

menos agua de lo acostumbrado, aunque gran parte de este déficit fue recuperado con agua subterránea. Los costos agropecuarios (ej. terrenos improductivos y elevados costos del agua) ascendieron a \$2 mil millones de dólares en el sector y cerca de 10,000 empleos. Por otra parte, en respuesta a programas locales voluntarios y al mandato estatal de conservación anunciado en abril 2015, las áreas urbanas recortaron el uso del agua cerca del 25% entre el 2013 y principios del 2016. Otros sectores, como el medio ambiente, también fueron afectados severamente y el riesgo de incendios se incremento. Hoy en día, el estado debe tomar decisiones, tales como retener o no agua fría en las represas para mantener el salmón en peligro o liberar el agua para proteger el eperlano en el Delta o apoyar los refugios de vida silvestre. Se han destinado más de \$3 mil millones de dólares para enfrentar los impactos de la sequía y mejorar el manejo del agua. De acuerdo con los autores, la situación en California es un ejemplo de cómo la sequía fomenta el uso y manejo eficiente del agua e inversiones en nuevos suministros, tales como reciclaje de aguas residuales, almacenaje de aguas subterráneas, y recopilación de aguas lluvias.

Con excepción de la sequía meteorológica, los otros tres tipos de sequías corresponden prácticamente a impactos de ésta, por ello es necesario identificar los procesos relacionados con las causas de las afectaciones y pérdidas económicas, es decir, los factores que resultan en vulnerabilidad de un sector, sistema o región a la falta de lluvia. A partir del análisis de los factores de vulnerabilidad, las acciones para reducir el riesgo y por tanto los impactos de las sequías deben incorporarse en un esquema de gestión integral.

Por otra parte, se cuenta con diversos índices para establecer la duración (inicio y fin), la intensidad y la extensión espacial de los períodos de las sequías y sus afectaciones directas (Heim, 2002; Steinemann, 2003; Mishra and Singh, 2010). Por ejemplo, el SPI-3 meses ha sido de gran utilidad para identificar que la ocurrencia de sequías de corta duración (3 a 6 meses) generalmente afectan al sector agrícola. Los índices de vulnerabilidad enfocados a la sequía agrícola requieren de variables, a veces difíciles de medir, como la condición de la vegetación, el tipo de suelo, su humedad y la evapotranspiración. El uso de la información por sensores remotos ha demostrado ser una fuente valiosa de datos sobre sequía agrícola, particularmente para identificar cambios en la vegetación (Peters *et al.*, 2002; Gu *et al.*, 2007; Xia *et al.*, 2014). En el caso de la sequía hidrológica, los índices de severidad se basan, en gran medida, en las mediciones de los caudales de los ríos. Sin embargo, la mayoría de los administradores del agua encuentran útil consultar más de un índice de sequía antes

de tomar una decisión, ya que los datos derivados de distintos índices pueden mostrar diversos aspectos del problema. La amplia gama de sectores económicos afectados por la sequía hace que los impactos directos e indirectos sean difíciles de cuantificar; y es por ello, que no hay un índice único capaz de caracterizar adecuadamente las formas de cada tipo de sequía. Después de todo la vulnerabilidad a la sequía meteorológica es dinámica y multifactorial.

En México, la herramienta base para definir la intensidad e impactos de las sequías es el Monitor de la Sequía de América del Norte. El Monitor utiliza el SPI, la anomalía de lluvia en porciento de lo normal, el Índice Satelital de Salud de la Vegetación que mide el grado de estrés de la vegetación a través de la radiancia observada, el Modelo de Humedad del Suelo *Leaky Bucket CPC-NOAA* que estima la humedad del suelo mediante un modelo hidrológico, el Índice Normalizado de Diferencia de la Vegetación (NDVI), la anomalía de la temperatura media, el porcentaje de disponibilidad de agua en las presas del país y la aportación de expertos locales, para identificar áreas afectadas por sequía. El Monitor utiliza una escala, siendo D0 (anormalmente seco) la categoría menos intensa y D4 (sequía excepcional) la de mayor intensidad.

Resulta importante señalar que la sequía meteorológica considerada como un peligro, es decir, un evento con potencial dañino, no siempre conlleva a un desastre. Lo que hace que se convierta en un desastre o no, depende de las características socioeconómicas de la sociedad, es decir, de su vulnerabilidad ante la escasez del recurso agua. Es por ello, que el análisis de la vulnerabilidad es primordial, al no ser lo mismo la escasez de agua porque llovió poco, que el mal manejo de ésta en diversos sectores. La selección e implementación de acciones para reducir los impactos de la sequía no puede basarse solo en la caracterización de la amenaza sino que es necesario evaluar la vulnerabilidad asociada a las sequías meteorológicas que resulta en sequías hidrológicas, agrícolas y socioeconómicas.

1.3 La gestión integral del riesgo ante sequías y el uso de la información climática

Comprender cómo se genera y evoluciona el riesgo ante sequías, o en otras palabras, evaluar la magnitud de los daños ante la ocurrencia de una sequía meteorológica, nos lleva a determinar la dinámica del clima y de la vulnerabilidad. Frente a la amenaza

climática hay poco que hacer, pero es posible gestionar y reducir el riesgo a través de un conjunto de elementos, medidas y herramientas dirigidas a la reducción de la vulnerabilidad, mediante acciones correctivas o estructurales, además de las respuestas de emergencia, y las preventivas, como lo son los sistemas de alerta temprana.

Actualmente, las acciones oficiales para reducir las pérdidas y costos asociados a las sequías comprenden esquemas para la toma de decisiones, planes o programas que incluyen la participación de tomadores de decisión y el establecimiento de acciones específicas por sector en respuesta al déficit de agua (ej. Courtenay and Wilhite, 2005; Sivakumar *et al.*, 2014; Wilhite *et al.*, 2014). Pero casi siempre, las acciones vienen después del desastre y en menor medida como forma de reducción del riesgo.

En México, la CONAGUA ha desarrollado algunos esfuerzos para monitorear y evaluar las sequías. En el 2012, se implementó el Programa Nacional contra la Sequía (PRONACOSE), cuyo objetivo es definir acciones para actuar antes, durante y después de una sequía. Se trata de una iniciativa sin precedentes en la materia, a través de la cual el tema se posicionó dentro de la estructura de la CONAGUA. Uno de los componentes principales del PRONACOSE son los Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía (PMPMS) desarrollados para cada uno de los 26 Consejos de Cuenca (CC) de México (Korenfeld *et al.*, 2014). En la elaboración de los PMPMS participaron universidades de todo el país en colaboración con los CC.

Ejemplos de los PMPMS se tienen para el CC de la Costa de Guerrero y el de la Costa de Oaxaca, en los que investigadores del Instituto de Geografía de la UNAM trabajaron en colaboración con los miembros de los CC (CONAGUA, 2014a; 2014b), lo cual mejoró la percepción que se tenía del riesgo ante la sequía. A pesar de que el desarrollo del PMPMS regional se dio en un periodo de lluvias intensas, se reconoció la importancia que la sequía tiene como peligro y la necesidad de contar con un plan de acción preventivo. De manera similar, se entendió que es necesario trabajar en mejorar las capacidades técnicas en la CONAGUA regional y en los CC para aprovechar la información climática existente.

Para todos los CC de México se desarrollaron evaluaciones de la vulnerabilidad. Sin embargo, estas no fueron validadas y sus resultados no fueron aprovechados en la selección de acciones preventivas y correctivas, para reducir los impactos de la sequía (CONAGUA, 2015). Si bien, las características de las acciones van acordes con la

escala del Monitor de la Sequía, resulta necesario precisar cuando se trata de sequía hidrológica, agrícola o socioeconómica. Además, se debe tener en cuenta que las acciones, en su mayoría estructurales, no son suficientes por sí solas para prevenir los daños por las sequías meteorológicas. Estos esfuerzos deberían ser vistos como complementos de otras medidas, como son enfocar el problema de la sequía hacia la gestión integral del riesgo y hacer uso de la información climática, en particular de los pronósticos climáticos.

El estudio de los factores que regulan el clima del planeta (altitud, latitud, relieve, etc.) ha registrado un considerable avance, pero aún es común escuchar en los medios de comunicación que hablan de El Niño o del cambio climático como los responsables de los desastres, recurriendo al paradigma naturalista, el cual plantea que los fenómenos naturales son sinónimos de desastre, por lo que poco se puede hacer para evitar sus impactos (Maskrey, 1993). En México se dispone de estudios que analizan los eventos de sequías meteorológicas así como los procesos dinámicos del clima relacionados con sus causas (Hernández *et al.*, 2007; Méndez and Magaña, 2010; Márdero *et al.*, 2012). Así mismo, se cuenta con predicciones estacionales del clima, que parecen ser mejores cuando el forzante es intenso, como en el caso de una condición El Niño o La Niña (Magaña, 1999). El uso de la información climática, así como la disponibilidad de los pronósticos debiera permitir la toma de decisiones preventiva de acuerdo con experiencias recientes de condiciones climáticas adversas. Pese a esto, un pronóstico estacional del clima rara vez constituye un elemento de apoyo para la planeación pues no considera los contextos de vulnerabilidad que modulan los impactos.

El uso de la información climática se vuelve cada vez más importante como estrategia de reducción del riesgo. En particular el monitoreo y pronóstico de sequía (Lyon *et al.*, 2012), posibilita la gestión del recurso agua a esta condición adversa. Aun cuando los pronósticos de este fenómeno no son perfectos, su uso para la gestión del riesgo coloca en mejor posición a los sectores socioeconómicos y ambientales para enfrentar la sequía con el fin de reducir la magnitud de los impactos e incluso evitarlos. El aprovechamiento de la información climática requiere del desarrollo de esquemas de gestión del riesgo que consideren la calidad de la información del clima, la caracterización y evaluación de la vulnerabilidad y el tipo de acciones que se pueden implementar considerando los diagnósticos y pronósticos climáticos. Un ejemplo de herramienta de gestión de riesgo ante la materialización del peligro, es decir ante la amenaza, son los sistemas de alerta temprana, por ejemplo ante sequías (SIATS) (Neri, 2010).

El desarrollo e implementación de un SIATS se sustenta en el análisis del riesgo, es decir, a través de comprender de qué manera los elementos peligro, y aquellos que generan la vulnerabilidad en un sector se combinan para convertirse en desastre. El conocimiento del riesgo requiere identificar el comportamiento histórico de la amenaza y la dinámica de la vulnerabilidad de un sector, para con ello estimar los posibles impactos cuando se alcanzan niveles de riesgo crítico. Ante la posibilidad de tener impactos no deseados en una próxima ocurrencia de sequía meteorológica, su monitoreo pronóstico, en combinación con información sobre la vulnerabilidad del sector hídrico, marcan la pauta para definir los niveles de alerta. Los elementos que definen si hay o no una sequía deben ser identificados a partir de la caracterización del sistema o región en riesgo, y de cómo éste ha respondido o si tiene la capacidad para hacerlo.

Lo anterior genera dos principales retos: 1) Comprender el funcionamiento de la interacción entre la sequía meteorológica y la sociedad, pues la evaluación del riesgo requiere tener en cuenta el carácter dinámico tanto de la amenaza como de la vulnerabilidad de los sectores afectados, reconociendo que ésta última es multifactorial, y que surge de procesos tales como la urbanización, los cambios en el uso de la tierra en zonas rurales, y la degradación en general del medio ambiente y 2) Identificar la información climática que resulte relevante para entender el riesgo, es decir, la generación de los llamados “productos climáticos a la medida de las necesidades del usuario” que se obtiene al trabajar de manera coordinada con los tomadores de decisiones para producir insumos orientados a la planeación de actividades y la comunicación de alertas.

El presente trabajo se orienta en evaluar la vulnerabilidad del sector hídrico ante sequías, por ello, en la siguiente sección se especifica en qué consisten los factores que la determinan y el rol que juegan en la ecuación de riesgo. Constituye una aportación metodológica que parte del conocimiento del sector y las experiencias de impactos recientes de la sequía en México en diversas regiones y sectores.

1.4 Vulnerabilidad y riesgo: bases teórico-conceptuales

Los desastres asociados con las sequías meteorológicas son considerados como únicos por el proceso lento con que ocurren, su duración y su escala espacial. Sin embargo, las acciones enfocadas a la atención de dichos impactos siguen patrones

tradicionales, es decir, se responde a la emergencia tal cual se hace ante otros desastre relacionados con las lluvias extremas, las olas de calor, los sismos, etc.

Retomando la *Teoría de los Desastres* (Hewitt, 1983; Maskrey, 1994; Lavell, 1996; Lavell y Franco, 1996), durante varias décadas se creyó que la causa principal de éstos eran los fenómenos naturales (algunos aún siguen considerando el paradigma naturalista como cierto), lo que ha llevado a la búsqueda de sus causas (y del riesgo) únicamente en análisis de las amenazas. Esta visión (incompleta) ha transitado hacia el estudio de los procesos económicos, sociales y políticos en la sociedad como una componente esencial para desarrollar estrategias de prevención proactivas, así como el fortalecimiento del papel de la planificación nacional y la legislación del manejo del riesgo para la reducción de los desastres, incluyendo la participación comunitaria (O'Brien *et al.*, 2006).

Desde hace varias décadas, los desastres son considerados como la manifestación del riesgo no manejado, es decir, ocurren cuando un sector vulnerable es afectado por una amenaza (fenómeno natural) (Wilches-Chaux, 1998). Si bien, se acepta que el concepto del riesgo varía dependiendo de la perspectiva de la disciplina de análisis (O'Brien *et al.*, 2006; O'Brien *et al.*, 2008; Tompkins *et al.*, 2008; Djalante, 2012), no existe un acuerdo entre especialistas sobre una definición de riesgo, ni sobre los elementos que lo conforman. Para los fines de este trabajo, el riesgo es definido como el resultado de la interacción entre un evento potencialmente perjudicial (peligro o amenaza) y las condiciones de vulnerabilidad de una sociedad o elemento expuesto a tal evento (UNISDR, 2004; Grossi and Kunreuther, 2005; IPCC, 2007; Cardona *et al.*, 2008; UNISDR, 2011).

Por otro lado, la gestión del riesgo se ha orientado hacia la respuesta más que a la prevención (UNISDR 2009; IPCC, 2012). Las medidas ingenieriles o estructurales se han convertido en prioritarias, y aunque éstas son necesarias, no siempre son suficientes para reducir el riesgo a niveles tolerables. Recientemente el tema ha cobrado importancia bajo el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, que impulsa a los estados a adoptar medidas específicas en todos los sectores, en los planos local, nacional, regional y mundial, con respecto a cuatro esferas prioritarias: (1) comprender el riesgo de desastres, (2) fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionarlo, (3) invertir en la reducción del riesgo de desastres y (4) aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar

una respuesta eficaz y para mejorar en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción (UNISDR, 2015).

Para el presente estudio, la vulnerabilidad es comprendida como "las condiciones determinadas por factores físicos, sociales, económicos y ambientales o procesos que aumentan la susceptibilidad de un sistema o comunidad al impacto de los peligros" (UNISDR, 2004). Los factores de vulnerabilidad son diversos y al final son representados como indicadores que posteriormente resultan en un índice (Neri and Magaña, 2016) y de esta forma, la estimación de la vulnerabilidad, en combinación con el peligro o la amenaza (en este caso la sequía meteorológica), sirve para calcular el riesgo. Éste, a su vez, se compara con la magnitud o la frecuencia de los desastres asociados al déficit de precipitación en su dimensión espacial o temporal para los últimos años, como forma de validación del modelo de riesgo.

Para estimar el riesgo climático, el estudio y la evaluación del peligro es un paso fundamental. Pero hoy se reconoce que evaluar la vulnerabilidad de los sectores socioeconómicos ante condiciones climáticas adversas necesario y constituye un reto, ya que no hay una metodología universalmente aceptada para este fin. No se cuenta aún con un sistema de evaluación, un indicador o una medida común que pueda generalizarse para su aplicación. Conceptualmente, la vulnerabilidad ha pasado de enfocarse en la exposición y en el potencial impacto, a un mejor entendimiento de los factores que la determinan en relación con la sensibilidad social, los impactos y la capacidad de adaptación (Cardona *et al.*, 2012). Para algunos autores, la variable exposición puede ser eliminada por considerarla implícita en la vulnerabilidad, bajo el argumento de que no se es vulnerable si no se está expuesto (ej. Cardona, 1990; OEA, 1993; CEPAL, 2000). Es así que se consideran diversos elementos relacionados con la vulnerabilidad, no sólo en relación con el aspecto físico de los fenómenos o del lugar, sino también con aquellos que determinan contextos y dinámicas socioeconómicas e incluso, culturales. Por lo anterior, medir la vulnerabilidad es un asunto complejo, donde los expertos en el tema coinciden en que el establecimiento de un índice general prácticamente es imposible, dadas las diferencias contextuales de cada caso. Sin embargo, cualquiera que sea el método usado, los resultados deben orientar la toma de decisiones para la reducción de la vulnerabilidad y el riesgo. Por ejemplo, Preston and Stafford-Smith (2009) y el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (Cardona *et al.*, 2012) hacen un recuento sobre los roles de la evaluación de la vulnerabilidad, concluyendo que va más allá de conocer la amenaza y sus efectos, pues requiere considerar el entorno

social y ecosistémico del impacto, para así proponer un proceso de gestión del riesgo en el sentido de adaptación (Tabla 2).

Algunos índices de vulnerabilidad hasta ahora desarrollados han servido para identificar, evaluar y monitorear tal condición (Blaikie *et al.*, 1994; Bogardi y Birkmann, 2004; Birkmann, 2006; Hahn *et al.*, 2009; Malik *et al.*, 2012; Torres *et al.*, 2012; Borja-Vega y De la Fuente, 2013). Otras propuestas han sido desarrolladas siguiendo un enfoque de riesgo (Cardona, 2005; Carreño, *et al.*, 2004), donde se insertan indicadores que se ajustan a los elementos intrínsecos y externos de las condiciones de vulnerabilidad. Cabe señalar que la mayoría de los métodos usualmente parten de los elementos definidos por el IPCC (2012) (nivel de exposición, grado de sensibilidad y la capacidad de adaptación).

Tabla 2. Roles de la vulnerabilidad

Preston and Stafford-Smith (2009)	IPCC (Cardona <i>et al.</i> , 2012)
1. Asegurar la reducción de la vulnerabilidad social y ecológica.	1. Medir la vulnerabilidad para determinar la necesidad de adaptación, con información acerca de la naturaleza de la vulnerabilidad e identificar las mejores opciones de adaptación.
2. Facilitar el aprendizaje y la gestión de la adaptación.	2. Medir y monitorear el proceso de implementación de acciones de adaptación, aunque es preciso definir qué tanto se hace en cuestión de adaptación que no forme parte del desarrollo normal.
3. Proporcionar la rendición de cuentas para inversiones en adaptación.	

De manera particular, se han desarrollado índices enfocados en la vulnerabilidad climática, como el *Monitor de Vulnerabilidad Climática*, desarrollado por DARA (2012), que mide el impacto global del cambio climático y la economía del carbono en términos socioeconómicos, tanto para el presente como para el futuro próximo. Este monitor calcula y compara la vulnerabilidad de 184 países a través de cuatro áreas de impacto (desastres ambientales, cambio de hábitat, impacto en la salud y el estrés industrial), usando 34 indicadores relacionados con el clima y el carbono. Una desventaja de este tipo de evaluación, a nivel nacional, es que no profundiza en particularidades relacionadas con el carácter local de la vulnerabilidad que determina la magnitud de los impactos. Ello implica que la vulnerabilidad ante un fenómeno puede ser altamente contrastante en el espacio por lo que generalizaciones a nivel país, como en el caso de México resultan inapropiadas.

Otro ejemplo de índice es el *Social Vulnerability Index for the United States - 2006-10* (Sovi) elaborado por Cutter *et al.* (2013) del *Hazards & Vulnerability Research Institute, Department of Geography, University of South Carolina*, el cual mide la vulnerabilidad social de EUA y sus condados respecto a los peligros ambientales, a través de una métrica comparativa que facilita el análisis de las diferencias de vulnerabilidad social y las sintetiza en 29 variables socioeconómicas para contribuir en la capacidad de preparación, respuesta y recuperación de peligros. Aunque cada variable tiene cierta importancia su manejo en conjunto resulta impráctico para caracterizar la dinámica de la vulnerabilidad por lo que se puede reducir su número. Esto permitiría identificar aquellos aspectos más importantes a ser destacados para el análisis y seguimiento de la vulnerabilidad en cada dominio en que se defina.

Por otra parte, se han desarrollado guías, como *Vulnerability Sourcebook Concept and guidelines for standardized vulnerability assessments* (Fritzsche *et al.*, 2014), las cuales proporcionan una metodología para cuantificar la vulnerabilidad de diversos sectores con niveles espaciales y horizontes de tiempo. En dicha metodología la vulnerabilidad se cuantifica a través de indicadores y se muestra cómo usar su evaluación para monitorear la adaptación. En esta metodología destaca la forma en que los indicadores son identificadores trabajados con actores clave, para llegar a lo que se define como una cadena de impactos. Sin embargo, para alcanzar este objetivo se requiere desarrollar talleres y asegurar la participación activa de los actores clave.

A nivel nacional se cuenta con el Índice de *Vulnerabilidad y adaptación a los efectos del cambio climático en México*, desarrollado por Monterroso *et al.* (2013). Este índice define los territorios más vulnerables a los efectos del cambio climático a escala municipal, a través de 13 variables de exposición, 9 variables de sensibilidad y 16 de capacidad adaptativa. Si bien, los resultados se presentan a través de una clasificación útil para la toma de decisiones, los indicadores usados son descriptivos, por lo que no reflejan las causas de los procesos intrínsecos de la vulnerabilidad y es imposible validar o calificar el modelo, lo cual lo hace impráctico. Una de sus fallas está en uso de variables en diversas escalas temporales, tanto históricas como de escenarios de cambio climático, al momento de evaluar la vulnerabilidad por ejemplo a futuro, sin primeramente modelar la vulnerabilidad presente y validar el modelo a través de los impactos recientes.

Otro caso de caracterización de la vulnerabilidad climática es el elaborado por el Instituto Mexicano para la Competitividad A.C. (IMCO, 2012). El *Índice de Vulnerabilidad Climática* (IVC) permite medir y analizar el nivel relativo de riesgo relacionado con fenómenos climatológicos al cual se exponen las zonas metropolitanas de México. Se compone de tres categorías: climática (3 indicadores), social (5 indicadores) e infraestructural (11 indicadores). Las zonas metropolitanas como escala de análisis son de gran ayuda para la disponibilidad de información. Los datos utilizados en la elaboración de este índice cumplen con las condiciones de ser publicados con regularidad, provenir de fuentes confiables, ser de fácil interpretación y contar con metodologías de cálculo transparentes y accesibles. Sin embargo, adolece del problema común en que el modelo de riesgo que se construye no es validado con respecto a los impactos recientes.

Finalmente, el *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*, desarrollado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (Soares *et al.*, 2010), presenta un índice que la evalúa entre diversos grupos sociales, bajo condiciones de cambio climático. Los autores reconocen que el índice puede tener diferencias importantes entre las regiones hídricas del país, pues no todas son vulnerables socialmente, pero no muestra que dichos contrastes en vulnerabilidad llevan a impactos diferenciados aun cuando se enfrenten a una amenaza similar.

Con base en la revisión de diferentes casos, se puede deducir que la mayoría de los índices se centran en la medición instantánea de la vulnerabilidad, esto es, no consideran que la vulnerabilidad es multifactorial y dinámica. Tampoco ofrecen alguna orientación sobre los procesos socioeconómicos relacionados con sus causas, a través de los cuales se puedan identificar aspectos que reduzcan la vulnerabilidad a futuro. A pesar de ser referido con frecuencia, el uso de la definición de vulnerabilidad del IPCC por ejemplo, omite tomar en cuenta que en la definición de exposición se requiere considerar que la ocurrencia de una amenaza no necesariamente implica daños o pérdidas. Con base a las reflexiones anteriores se ha decidido construir un modelo de riesgo ante sequía (Neri and Magaña, 2016) que parta de la separación de la amenaza y de los factores de vulnerabilidad considerando ésta como dinámica y multifactorial, y en donde el riesgo explique los impactos recientes con sus características espacio temporales correspondientes.

Es así que, si se desea reducir la probabilidad de los impactos negativos por la sequía meteorológica, es necesario reducir la vulnerabilidad en el sector bajo estudio. Para

esto, resulta necesario desarrollar una aproximación metodológica al estudio de la vulnerabilidad que considere las características de la sequía. Cuantificar la vulnerabilidad ante sequías a través de indicadores permitirá priorizar acciones preventivas y darles seguimiento de forma que se demuestre que éstas cumplen su cometido de reducir el riesgo y el desastre.

1.5 Objetivos

Con la finalidad de contribuir al desarrollo de un plan de acción para reducir el riesgo ante sequías meteorológicas y sus impactos en México, el objetivo principal de este trabajo es desarrollar una metodología para evaluar cuantitativamente la vulnerabilidad del sector hídrico, considerando su carácter multifactorial y dinámico, de tal forma que los impactos en los sectores agrícola e hídrico puedan ser contrastados espacial y temporalmente con las estimaciones de riesgo.

Los objetivos específicos de esta tarea incluyen:

1. Construir diagnósticos de vulnerabilidad y riesgo ante sequía para México para cada una de las Regiones Hidrológico-Administrativas (RHAs) en que se realiza la gestión hídrica.
2. Desarrollar un modelo de riesgo ante sequías a partir de la identificación de los principales factores que lo generan, y aprovechando la información climática.
3. Mostrar que un índice de riesgo ante sequías meteorológicas permite generar escenarios de impacto útiles para la gestión de riesgo y la prevención o disminución de la magnitud de los impactos negativos.

La presente tesis incluye una descripción de la metodología y datos utilizados, así como la propuesta metodológica desarrollada e implementada (capítulo 2). También presenta la aplicación de dicha metodología y los resultados obtenidos cuando se compara con la ocurrencia de impactos (sequía hidrológica o agrícola) recientes (capítulo 3). Se discute la sequía como un problema de gestión para la prevención del riesgo (capítulo 4); y, finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo y se marcan los pasos futuros a seguir en la gestión integral de riesgo ante sequía meteorológica (capítulo 5).

2. METODOLOGÍA Y DATOS

2.1 El uso de indicadores para evaluar vulnerabilidad y riesgo

Para reducir la vulnerabilidad y por tanto el riesgo ante sequías es necesario pasar de una evaluación cualitativa a una cuantitativa, que permita monitorear y evaluar si las acciones enfocadas a este fin cumplen o no con su propósito de reducir la ocurrencia y magnitud del desastre. Definir las condiciones para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo a partir de una visión cuantitativa, permite homologar la información obtenida de diversas fuentes, unificar criterios de medición y calificar objetivamente los factores de vulnerabilidad ante un déficit de precipitación.

La evaluación de vulnerabilidad del sector hídrico ante la sequía meteorológica parte del desarrollo de un modelo conceptual que trata de representar la dinámica de los factores físicos, sociales, económicos y ambientales relacionados con la susceptibilidad del sector a déficit en la precipitación esperada. El modelo conceptual se pone a prueba al tratar de explicar situaciones de desastre reciente, es decir, a través de los impactos negativos de la sequía meteorológica reflejada en sequía hidrológica y sequía agrícola. La magnitud de éstas últimas dependerá de factores de vulnerabilidad. Algunos factores tendrán mayor peso para cierto tipo de impacto en determinada región. Sin embargo, en el presente estudio se considerarán las sequías hidrológicas y agrícolas como manifestaciones de una vulnerabilidad relacionada con factores comunes que pueden ser caracterizados a través de parámetros y relaciones funcionales. Identificar y seleccionar los parámetros adecuados, así como construir dichas relaciones, es una parte esencial de la cuantificación de la vulnerabilidad.

Una vez identificados los factores de la vulnerabilidad, es necesario buscar datos históricos para representarlos y así analizar su dinámica en el tiempo con indicadores. Éstos son definidos a partir de parámetros (propiedades del sistema que se miden), o de un valor derivado de otros parámetros, e intentan proveer información sobre el estado de un fenómeno, ambiente o área, con un significado añadido mayor que el directamente asociado a su propio valor (OECD, 2003). Por otra parte, un índice será un conjunto agregado o ponderado de parámetros o indicadores que describen algún aspecto del sistema y su dinámica (Fig. 4).

Los indicadores, y a su vez los índices, son una respuesta a la necesidad de ordenar y sistematizar la información de modo que sea inteligible y asequible para la toma de decisiones. Los indicadores también apuntan a: i) reducir el número de medidas y

parámetros que normalmente se requieren para representar una situación y ii) simplificar el procesos de comunicación. Al mismo tiempo, permiten evaluar las condiciones y tendencias del sistema, proveen información para comparaciones espaciales y/o sectoriales, y proporcionan información temprana respecto a las condiciones futuras (líneas de referencia base). Además, a partir del análisis de su comportamiento o variación se pueden obtener escenarios a futuro que consideren la implementación o no de medidas preventivas.

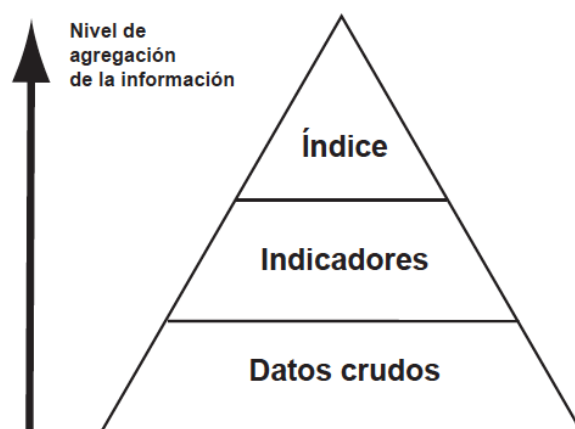


Figura 4. Nivel de agregación de la información para la construcción de índices a partir de indicadores y de datos crudos. Fuente: Cendrero (1997)

Los indicadores se construyen a partir de datos de contextos regionales, nacionales o internacionales. Usualmente es necesario recurrir a *proxis* (medida indirecta) para inferir el comportamiento de alguno de los factores del cual no hay datos medidos directamente (Fritzsche *et al.*, 2014) o para algún parámetro complejo, multidimensional y de significancia social (ej. capacidad de manejo de riesgo ante desastre) (USAID, 2014). Es recomendable que las fuentes de datos usadas en la construcción de indicadores sean las agencias de gobierno u organismos oficiales internacionales, para darles mayor certeza. Los censos de población, los censos económicos, y el seguimiento que las secretarías de estado dan al comportamiento de una rama de la actividad económica, son algunos ejemplo de fuentes de datos a partir de los cuales se pueden construir indicadores.

La construcción de un índice debe cumplir con varios elementos. Los indicadores deben ser relevantes sobre los procesos en un sistema, considerando la disponibilidad y acceso a datos con los que se elaboran, lo que incluye tomar en cuenta la

periodicidad con que son publicados (esto puede proporcionar vigencia y actualidad). Deben ser relativamente claros para facilitar su significado y relevancia en la descripción de procesos o condiciones del sistema. Finalmente, el índice que resulte de combinar indicadores debe ser de fácil interpretación y su cálculo transparente y accesible.

El fin último de la cuantificación de la vulnerabilidad ante sequías meteorológicas es que, en combinación con la información sobre el peligro, resulte en una estimación del riesgo que permita su gestión mediante acciones preventivas. Además, cabe destacar que el objetivo principal de evaluar la vulnerabilidad y el riesgo no es obtener un número *per se*, sino poder representar de forma simple procesos o dinámicas de un sistema que lo llevan a experimentar impactos negativos frente a un fenómeno natural, por ejemplo. El desarrollo de indicadores (factores) de vulnerabilidad, así como la contextualización del resultado final en términos de riesgo es lo que permite guiar la toma de decisiones, establecer prioridades, dirigir los recursos y manejar el proceso de disminución de la vulnerabilidad y desastres ante la sequía meteorológica.

2.2 Descripción de datos

Identificar los factores de vulnerabilidad del sector hídrico ante la sequía meteorológica requiere considerar aspectos como son: el estado físico de las diversas regiones del país, el uso y vocación del suelo, la biodiversidad, etc. Así mismo se deben analizar las relaciones espacio-temporales entre factores durante los periodos de sequía. Desde el ámbito socioeconómico, se tienen que investigar aspectos relacionados con la densidad de población y su distribución, la dinámica demográfica, las demandas y usos del agua, el ingreso económico de la población, el acceso a servicios, la dinámica de las actividades productivas, etc., para a partir de ello establecer las capacidades existentes para prepararse a un fenómeno como la sequía.

Para nuestro caso de estudio, resulta primordial contar con un panorama de la situación del sector hídrico tanto en años normales como en años de sequía meteorológica. La CONAGUA provee información histórica de diversos factores sobre el manejo del agua a través del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). En dicho portal se presentan datos anuales del 2005 al 2014 a nivel nacional, regional, estatal e incluso mundial sobre: el ciclo hidrológico, el estado de explotación de los acuíferos, la disponibilidad y déficit en aguas subterráneas y cuencas, la calidad del

agua superficial y subterránea, volúmenes de descarga de aguas residuales y agua concesionados, etc. Además, en la publicación “Estadísticas del Agua de México”, de la misma institución, se pueden encontrar datos de este tipo desde el 2002. Estos datos son publicados de manera periódica lo cual permite construir indicadores, su historia y sus tendencias.

El desarrollo de un modelo que describa los procesos a través de los cuales la sequía genera riesgo en el sector hídrico, requiere además de la cuantificación de la vulnerabilidad, la caracterización del peligro. Esto se puede hacer usando por ejemplo el SPI, el cual cuantifica las anomalías de precipitación en múltiples escalas de tiempo (3, 6, 12, 24 meses) dependiendo del impacto buscado (WMO, 2012). El SPI es usado para definir la intensidad de sequía meteorológica en el Monitor de Sequía, el cual es la fuente oficial de información del gobierno. Los datos de SPI usados en el presente estudio fueron obtenidos de la biblioteca de datos del *International Research Institute for Climate and Society* (IRI).

Finalmente, un aspecto esencial es la validación del modelo de riesgo a través de la comparación con los impactos recientes. Los resultados en el sector agrícola mexicano están fuertemente relacionados con la ocurrencia de eventos meteorológicos y climáticos extremos. Es por ello que la sequía agrícola es descrita con los datos del Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON) de la SAGARPA. Por otro lado, la información de impactos en el sector hídrico es representada por los volúmenes de almacenamiento de agua en las principales presas del país. Dichos datos son obtenidos de la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos de la CONAGUA y publicados en el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la SAGARPA.

3. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y EL RIESGO ANTE SEQUÍAS EN MÉXICO

3.1 Propuesta metodológica

La metodología seguida para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo de sequía agrícola e hidrológica parte de las ideas planteadas en la Guía Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad ante Cambio Climático (INE, 2013), desarrollada para el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. En el estudio presente se consideró a la sequía meteorológica como el factor peligro principal en términos de déficit de lluvia, más que de los cambios en la temperatura. Se realizaron ajustes a la metodología inicial, conservando los componentes esenciales de la Guía. La estimación de la vulnerabilidad y el riesgo se hizo en cuatro etapas:

Etapas 1: Caracterización de la vulnerabilidad

Se enfoca en responder tres preguntas generales que definen los objetivos y alcances de la evaluación.

1. *¿Quién o qué es vulnerable?*: Selección del objeto de estudio (región, grupo social, o sector económico), y del dominio y la resolución espacial con que pueden definirse sus características.
2. Vulnerable *¿a qué?*: Determinación del evento de tiempo o anomalía del clima que causa o que se espera tenga un impacto negativo en el objeto de estudio.
3. *¿Por qué es vulnerable?*: Identificación de los factores potenciales que han hecho y hacen al objeto de estudio vulnerable, es decir sujeto de daños cuando se presenta el fenómeno de tiempo o clima identificado en el *qué*.

El objeto de estudio de este trabajo es el sector hídrico en cada una de las 13 RHAs del país, y los impactos analizados son la sequía agrícola y la sequía hídrica. La definición de la escala espacial del objeto de estudio con que se caracteriza la vulnerabilidad esta definida por la forma de administración del recurso hídrico de la CONAGUA. Las sequías ocurren en una extensión muy amplia (miles de kilómetros cuadrados), a veces de escala subcontinental, y pueden presentarse por periodos de tiempo largos (más de un año). Sin embargo, la gestión del agua generalmente es a

nivel de RHA, tanto por la dimensión del peligro como por la de la respuesta requerida. Las RHAs son las unidades básicas de gestión de los recursos hídricos, y sus dominios de acción respetan las formas municipales para facilitar la administración e integración de la información socioeconómica (Fig. 5), combinando aspectos de la política con elementos de la cuenca hidrológica. Son así una combinación entre cuenca y unidad administrativa y se subdividen en dos CC, en donde se actúa bajo un modelo de gobernanza con la participación de actores clave de la sociedad y del gobierno. Los factores de vulnerabilidad son identificados a partir del análisis del contexto del sector hídrico en 13 RHAs, así como las decisiones y acciones que los han definido en años recientes.

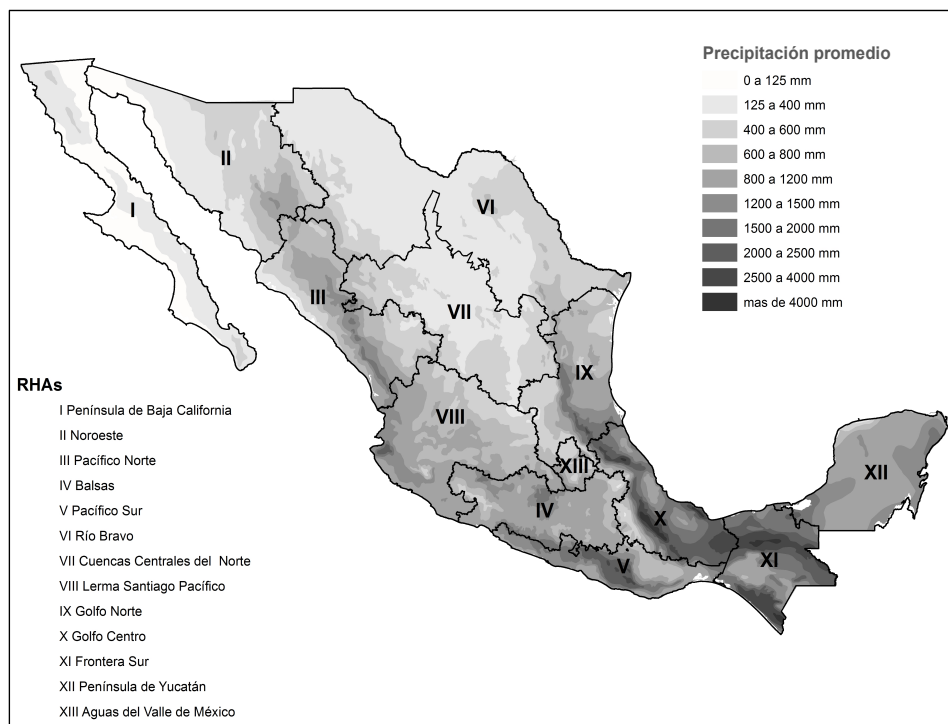


Figura 5. Regiones Hidrológico Administrativas (RHAs) de CONAGUA. Fuente: CONABIO, 2015.

Etapas 2: Estimación de la vulnerabilidad

Esta etapa se enfoca en desarrollar un índice representativo de la vulnerabilidad ante sequías meteorológicas a partir de la reflexión de las posibles causas que hacen al sector hídrico vulnerable. Parte de una reflexión creativa de las causas del impacto y de su evolución, recopilando información histórica y actual que represente los factores de vulnerabilidad y que servirán para desarrollar los indicadores. La selección y diseño de los indicadores requiere de creatividad y del conocimiento del sector y de las causas de los desastres relacionados con las sequías meteorológicas. Son múltiples

las causas que pueden hacer a un sector o región vulnerable ante la sequía, y caracterizar a todas ellas volvería el problema de grandes dimensiones y sobre todo, difícil de analizar como modelo dinámico, dada la cantidad de variables que se requerirían. Por ello, algunos indicadores combinan dos o más factores de vulnerabilidad.

Los factores describen aspectos físicos, sociales y económicos que afectan al sistema y los pone en menor o mayor disposición a ser impactados negativamente por una sequía meteorológica. Cada uno de los factores hace más o menos vulnerable a una RHA, y esto debe tomarse en cuenta al momento de determinar los contrastes regionales del riesgo. Sin embargo, para simplificar la aplicación de la metodología, resulta conveniente que los indicadores pasen por un proceso de normalización, para tener valores entre 0 y 1, y que más adelante se combinen con un simple promedio aritmético.

Con la finalidad de promediar los indicadores de vulnerabilidad en cada región (V_r), los datos se normalizan usando la siguiente relación:

$$V_r(t) = \frac{\alpha_i(t) - \min(\alpha)}{\max(\alpha) - \min(\alpha)}$$

donde $V_r(t)$ es el indicador normalizado para un año t en particular, (α) representa los datos de cada indicador, y $\max(\alpha)$ y $\min(\alpha)$ son los valores máximos y mínimos que alcanza en el periodo de estudio. De esta forma, $0 \leq V_r \leq 1$, donde el valor mínimo de la vulnerabilidad corresponde a 0 y el máximo a 1.

El promedio ponderado de los indicadores de vulnerabilidad normalizados da como resultado el índice de vulnerabilidad (\bar{V}_I), el cual está en función del tiempo:

$$\bar{V}_I(t) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i V_{r_i}(t)}{n}$$

donde n es el número de indicadores y w_i es el peso que representa la importancia de cada uno de los indicadores de la vulnerabilidad. Si bien, dichos indicadores pueden ser ponderados de acuerdo a diversos criterios, para este estudio se considera el mismo peso para cada uno. La evolución temporal del índice es una propiedad fundamental en cualquier estimación de vulnerabilidad pues refleja su carácter

dinámico. La dinámica de la vulnerabilidad reflejan por lo general procesos de baja frecuencia, con frecuencia de mayor periodo que los del peligro, que generalmente corresponde a componente de la alta frecuencia del riesgo. Es importante considerar por tanto la historia de cada uno de los indicadores para saber con qué velocidad afectan la dinámica de la vulnerabilidad. Su comportamiento, en conjunto con la de la actividad de la amenaza, resulta en un riesgo dinámico que debe ser comparable con la actividad y características de los impactos.

Etapas 3: Evaluación del riesgo

Esta etapa se enfoca en desarrollar un modelo que describa los procesos por los cuales la sequía meteorológica resulta en impactos como son la sequía hidrológica y la sequía agrícola. Es a través de una estimación empírica del riesgo que analiza qué tan adecuada puede ser la evaluación de la vulnerabilidad, considerando esencialmente que ésta corresponde a la componente moduladora de baja frecuencia del riesgo.

El peligro es definido como la probabilidad de que ocurra una condición de tiempo o clima que en un contexto vulnerable que genere un impacto negativo. El peligro se “materializa” o se manifiesta en amenaza cuando el fenómeno natural se presenta en un momento o periodo específico con una cierta magnitud. El peligro ante una sequía puede ser definido a partir de la estimación de la probabilidad de ocurrencia de ciertas anomalías de precipitación o a través de la definición de un valor umbral asociado a los impactos. De esta forma, el riesgo se calcula multiplicando los valores de peligro P por el índice de vulnerabilidad VI :

$$\text{Riesgo} = (\text{Peligro} \times \text{Vulnerabilidad})$$

para un periodo de análisis, o mediante la expresión

$$\text{Riesgo} = (\text{Amenaza} \times \text{Vulnerabilidad})$$

para un evento específico.

En el primer caso se analizarán las probabilidades de ocurrencia de un desastre a través de la estimación del riesgo con peligro, mientras que en el segundo caso se puede considerar la magnitud del desastre de un evento particular.

Etapas 4: Validación del modelo de riesgo

Con base en la dinámica histórica del riesgo evaluado con la actividad de sequías meteorológicas, se puede establecer la habilidad del modelo para explicar la actividad de impactos observados, que en presente estudio son: la sequía agrícola y la sequía hídrica. Se puede considerar que los indicadores y el índice de vulnerabilidad contruidos son adecuados si el comportamiento del riesgo calculado es similar al de la actividad e impactos. Si el modelo de riesgo no describe los impactos en su comportamiento de baja frecuencia, los factores de vulnerabilidad deben ser revisados y se debe modificar el modelo de riesgo hasta que se logre un mejor ajuste riesgo - impactos.

Resulta relevante la caracterización o medida de los impactos en una serie de tiempo reciente que muestre una relación funcional con el riesgo. Considerando la dinámica del peligro (sequía meteorológica) y de la vulnerabilidad, se determina que los cambios en cada uno resultan en cambios en el riesgo dependiendo de su magnitud (Fig. 6). Bajo esta perspectiva, al incrementar la vulnerabilidad (Fig.6a), el peligro (Fig.6b) o ambos (Fig.6c) se producen cambios en el riesgo que deben ser proporcionales a los observados en la actividad de impactos. En el caso de la sequía meteorológica, los impactos negativos corresponden a la sequía hidrológica y la sequía agrícola, siempre que se rebasa un nivel de riesgo crítico. Si el peligro y/o la vulnerabilidad aumentan, la frecuencia con que se rebasa el riesgo crítico aumentará y hará más frecuentes o intensos los impactos a menos que se gestione el riesgo reduciendo la vulnerabilidad.

Una vez planteada la metodología (Fig. 7), el siguiente paso es su aplicación. En los siguientes apartados se describe la caracterización de los factores de vulnerabilidad en cada una de las 13 RHAs, se analiza la problemática relacionada con las sequías meteorológicas, así como los aspectos administrativos que influyen en el manejo y distribución del recurso hídrico, se identifican y construyen los indicadores, se obtiene un modelo de riesgo y finalmente se evalúa su funcionamiento.

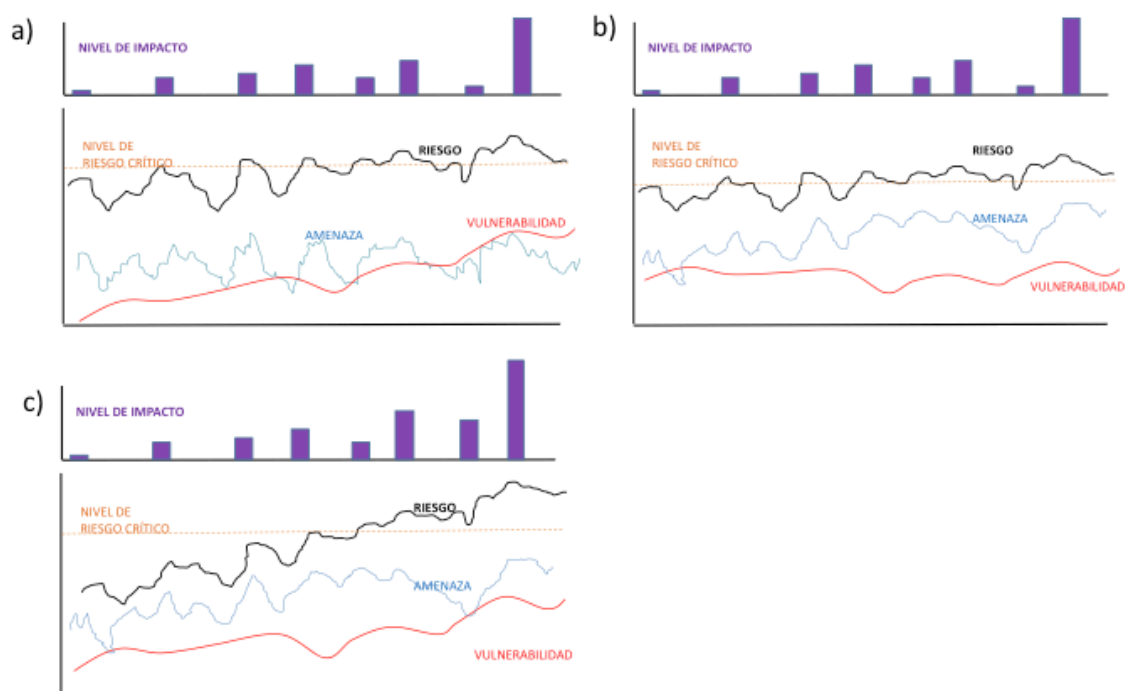


Figura 6. Diagrama de cambios en el tiempo del riesgo climático (línea negra) como consecuencia de la tendencia de: a) la vulnerabilidad (línea roja), b) el peligro (línea azul) y c) el peligro y la vulnerabilidad. Las barras moradas son una medida de los impactos. Fuente: INE, 2013.

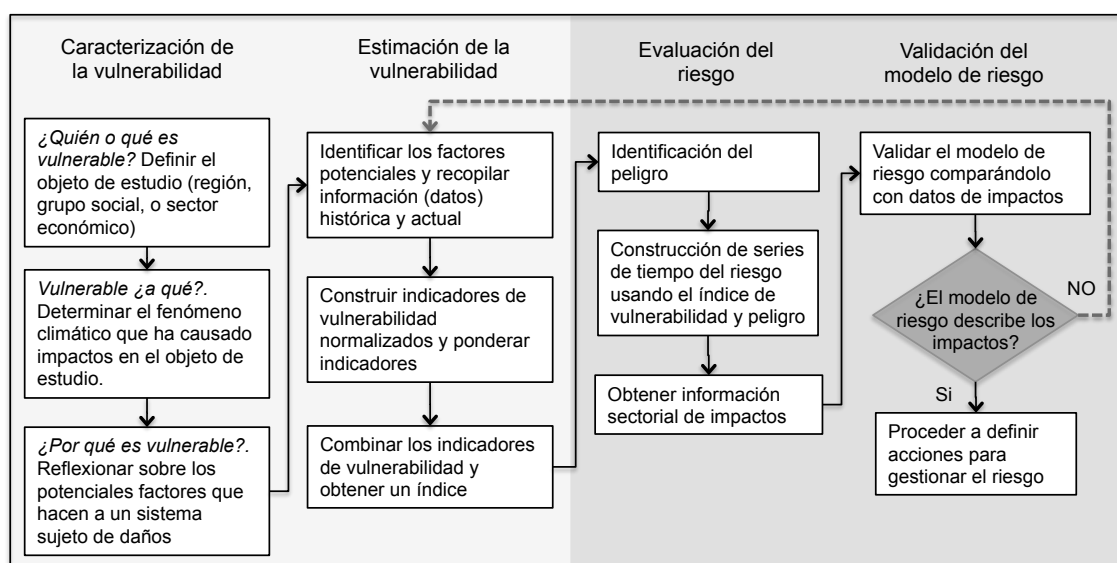


Figura 7. Metodología para estimar la vulnerabilidad y riesgo ante sequías.

3.2 Aplicación de la metodología

3.2.1 Etapa 1: Caracterización de la vulnerabilidad

México cuenta con 446,777 hm³/año de agua dulce renovable (CONAGUA, 2016), lo que debe contextualizarse considerando la distribución temporal y espacial de la lluvia,

así como los problemas locales asociados a los usos del recurso. Las regiones del sureste tienen dos terceras partes del agua renovable en el país, y una quinta parte de la población que aporta la quinta parte del producto interno bruto (PIB) nacional. Las regiones del norte, centro y noroeste cuentan con una tercera parte del agua renovable en el país, cuatro quintas partes de la población y de la aportación regional al PIB nacional. El agua renovable per cápita disponible en las regiones del sureste es siete veces mayor que la disponible en el resto de las RHAs (Tabla 3).

Tabla 3. Principales datos por RHA. Fuente: SINA-CONAGUA, 2016.

Región hidrológico-administrativa	Agua renovable (hm ³ /año)	Población (millones de habitantes)	Aportación al PIB nacional 2014 (%)	Grado de presión (%)	Clasificación del grado de presión
I. Península de Baja California	4,958	4.4	3.6	79.6	Alto
II. Noroeste	8,273	2.8	2.9	81.2	Alto
III. Pacífico Norte	25,596	4.5	2.9	41.9	Alto
IV. Balsas	22,156	11.7	6.1	48.7	Alto
V. Pacífico Sur	30,565	5.0	2.3	5.0	Sin estrés
VI. Río Bravo	12,316	12.1	14.3	77.2	Alto
VII. Cuencas Centrales del Norte	7,849	4.5	4.2	48.4	Alto
VIII. Lerma Santiago Pacífico	35,093	23.9	19.1	43.6	Alto
IX. Golfo Norte	28,085	5.2	2.2	21.0	Medio
X. Golfo Centro	95,129	10.5	5.6	5.7	Sin estrés
XI. Frontera Sur	144,459	7.6	4.9	1.6	Sin estrés
XII. Península de Yucatán	29,324	4.5	7.4	14.2	Bajo
XIII. Aguas del Valle de México	3,458	23.0	24.5	138.0	Muy Alto
Total Nacional	447,260	119.7	100	19.2	Bajo

La situación del sector hídrico para cada una de las 13 RHAs es en general de crisis, tal y como lo documentó desde hace más de diez años Breña (2004). La problemática relacionada con la cantidad y calidad del recurso persiste, y en muchos casos se ha agravado, como sucede para el indicador del grado de presión sobre el recurso hídrico, con regiones donde la situación alcanza niveles críticos en periodos de sequía, a pesar de que en promedio el grado de presión a nivel nacional se considere bajo (SINA-CONAGUA, 2016).

Situación del recurso hídrico en las 13 RHAs¹

- RHA I: Península de Baja California

La RHA I comprende los estados de Baja California y Baja California Sur, con un total de 11 municipios. Tiene una superficie de 156,779 km² que representa el 8% del territorio nacional. En el año 2014, la población alcanzó los 4,368,750 habitantes, de los cuales más del 90% es población urbana, concentrada en su mayoría en las ciudades de Tijuana y Mexicali.

En esta región, 50% del agua se extrae de las fuentes superficiales y 50% de fuentes subterráneas. De las extracciones totales para usos consuntivos, 65% corresponde a uso agropecuario, 29% al abastecimiento urbano y 6% a uso industrial. La RHA I participa con 3.6% del PIB nacional. En años recientes se ha construido una importante infraestructura para la producción agrícola en el distrito de riego 014 Río Colorado, en Baja California y el distrito de riego 066 Santo Domingo, en Baja California Sur que incrementa la demanda y el tratamiento de agua. La recarga media de los acuíferos es de 1,658 hm³/año, pero las extracciones ya han superado esa cantidad. De los 88 acuíferos de la región, los del Valle de Mexicali, Mesa Arenosa, Santo Domingo y Vizcaíno aportan mas del 60% del volumen y sus principales usos son el agrícola y el público urbano. Del total de acuíferos, 15 se encuentran sobreexplotados, 10 con intrusión salina y 4 con salinización de suelos y aguas subterráneas salobres.

Los principales problemas relacionados el recurso agua son:

- *Sobreexplotación de acuíferos.* Las demandas de agua por parte de los usuarios, principalmente en el uso agrícola y público urbano, están llegando al límite de la disponibilidad de los recursos, e incluso se está rebasando en ciertas zonas. Además, existe el problema de contaminación por intrusión salina en los acuíferos costeros provocada por la sobreexplotación.
- *Calidad del agua.* A pesar de que existe un convenio que establece el límite de salinidad para la entrega del agua del río Colorado por parte de los Estados Unidos de América, se tienen fluctuaciones diarias que rebasan esos límites con problemas consecuentes de deterioro para el riego.

¹ Los datos descriptivos de cada RHA fueron obtenidos del SINA (CONAGUA, 2016) y la descripción de los problemas relacionados con el recurso agua de Breña (2004).

- *Deficiente tratamiento de aguas residuales.* Las aguas residuales de las principales ciudades no reciben un tratamiento, lo que provoca problemas de contaminación puntual. Además, el nivel de reúso de agua es muy bajo.
- *Baja eficiencia de los sistemas de agua potable.* Se presentan rezagos en materia de agua no contabilizada y abastecimiento de servicios básicos a la población rural.
- *Baja eficiencia de riego.* La eficiencia global de los distritos de riego no es mayor al 50%. Existen problemas de azolve en la red de canales que reducen la capacidad hidráulica del cauce.

Las proyecciones de la población, por ejemplo para el año 2030, señalan que la región podría alcanzar los 5.7 millones de habitantes, de los cuales alrededor de 90% se concentrará en las ciudades de la franja fronteriza, con una fuerte presión adicional sobre los recursos hidráulicos al aumentar la demanda de servicios. De mantener los patrones de consumo actuales, se prevé que se incrementaría el grado de sobreexplotación y degradación de la calidad del agua de los principales acuíferos, lo que propiciaría una disminución de la disponibilidad y, a su vez, ocasionaría una fuerte competencia por el uso del recurso entre los distintos usuarios. Ya desde 2009 los consumos de la población urbana, como la de Tijuana, son en general relativamente bajos (de 50 a 100 l/per/día) lo que compromete la condición sanitaria de acuerdo a recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Navarro *et al.*, 2016)

- RHA II: Noroeste

La Región II Noroeste comprende 90% de la superficie del estado de Sonora con 72 municipios y 7 municipios de Chihuahua. Tiene una superficie de 197,579 km², 10% del territorio nacional. La población de la región en el año 2014 era de 2,803,163 habitantes. La población urbana representa el 85% concentrada en 10 ciudades de más de 50,000 habitantes y 53 centros urbanos medios, el 15% restante corresponde a la población rural. El porcentaje de población indígena en la región es de 2.8% y se concentra principalmente en las cuencas de los ríos Yaqui y Mayo. El desarrollo de esta región ha sido posible gracias a la agricultura de riego. El PIB de la región representa 2.9% del PIB nacional.

El 60% del agua se extrae de fuentes superficiales en la región y el 40% restante de fuentes subterráneas, del total 77% se destina a la agricultura, 19% se uso para

abastecimiento público y el 4% para uso industrial. Existen en la región 62 acuíferos, de los cuales 10 se encuentran sobreexplotados y 5 con intrusión salina. En el ámbito regional, la recarga media es de 3,207 hm³/año. De los acuíferos sobreexplotados, los que registran el mayor grado de afectación son el de Guaymas, Costa de Hermosillo, Sahuaral y Caborca. En los dos primeros existe también el problema de intrusión salina.

El escurrimiento natural medio en la región se estima en 5,066 hm³/año. Los ríos Yaqui y Mayo concentran la mayor parte del escurrimiento superficial, con poco más de 4,800 hm³. En Sonora se ha construido una importante infraestructura hidráulica que incluye 27 presas de almacenamiento, de las cuales 18 se ubican en la subcuenca del río Yaqui, cuatro en la del río Concepción, tres en la del río Sonora y dos en la del río Mayo. En total se cuenta con una capacidad de regulación de 9,300 hm³.

Los principales problemas relacionados con la cantidad y calidad del recurso agua son:

- *Deficiencias en el suministro de agua potable y alcantarillado.* Se presenta baja eficiencia en la red de distribución por altas pérdidas y mala sectorización. Asimismo, en la red de alcantarillado hay colapsos de tuberías cuya vida útil ha sido rebasada, así como taponamientos y afloramientos por falta de mantenimiento. Se tiene una mala administración que resulta en una baja eficiencia de facturación y recaudación. También existe alta rotación de personal de los organismos operadores, lo que afecta la continuidad de medidas o programas. Las pérdidas de agua en zonas urbanas como Hermosillo, Nogales, Puerto Peñasco y Guaymas son del orden de 46%.
- *Ineficiente uso y manejo del agua en la agricultura.* La eficiencia en los siete distritos de riego y dos unidades de riego es menor al 50%.
- *Contaminación de cuerpos de agua.* La problemática principal en este tema se refleja por descargas de aguas residuales de origen urbano e industrial en la Bahía de Guaymas, en la contaminación por descargas agrícolas en los esteros y bahías como Yávaros, Lobos y Bacochibampo y en la contaminación por efluentes urbanos provenientes de Hermosillo y de otras descargas urbanas y de granjas porcícolas en el río Mayo.
- *Insuficiente infraestructura de medición.* Existe insuficiente infraestructura de medición para calidad del agua y piezometría. Los recursos financieros

destinados mejoras de esta infraestructura, así como para su operación y mantenimiento han sido escasos. Existe un bajo nivel de capacitación del personal dedicado a este rubro.

- *Competencia entre los usos del agua.* Esta problemática se presenta en las cuencas de Sonoyta, Concepción y Sonora, donde se presenta un alto crecimiento de la población, por lo que el uso público urbano cada vez demanda mayor cantidad de agua, siendo su principal competidor el sector agrícola.
- *Sobreexplotación de acuíferos.* Este problema ha provocado un descenso continuo de los niveles de bombeo y, consecuentemente, el aumento de los costos de operación, el avance de la interfase salina, la salinización de la tierra, y, finalmente, el abandono de las tierras que alguna vez fueron productivas para la agricultura. El problema de sobreexplotación se presenta en 15 de las 47 zonas geohidrológicas de la región. En particular, la sobreexplotación a la que ha sido sometido el acuífero de la costa de Hermosillo durante décadas lo mantiene a la fecha en condiciones críticas.

Se estima que para el año 2030, la región alcanzará una población de más de 3.4 millones de habitantes. Uno de los mayores desafíos en la Región II lo constituye el lograr un manejo racional e integral de sus limitados recursos hidráulicos, con criterios de sustentabilidad, basados en el uso eficiente del agua, especialmente en las circunstancias adversas que se dan durante la época de estiaje y los largos periodos de sequías.

El gobierno del estado de Sonora emprendió un proyecto para tratar de solucionar la crisis de agua en Hermosillo: la construcción de un acueducto desde la Presa El Novillo hasta la ciudad de Hermosillo, a donde el agua llegaría por gravedad. Sin embargo, los productores agrícolas de la región del Yaqui se opusieron a entregar lo que consideran su agua. El tema ha generado graves conflictos sociales en la región, que se agravan en periodos de sequía (Curl *et al.*, 2015).

- RHA III: Pacífico Norte

La Región III Pacífico Norte se ubica en el Noroeste de México. La superficie de la región es de 152,010 km² que corresponde a 8% de la superficie nacional. Incluye la totalidad del estado de Sinaloa y porciones de los estados de Durango, Chihuahua,

Nayarit y Zacatecas. Comprende 13 cuencas hidrológicas, desde la del río Fuerte hasta la del San Pedro, las cuales para fines de planeación, se agrupan en cinco subregiones: Norte, Centro-Norte, Centro-Sur, Tuxpan y Guadiana. La población regional es de 4,467,253 habitantes, de los cuales más del 60% es población urbana y se asienta en las ciudades de Culiacán, Durango, Mazatlán, Los Mochis, Guasave y Guamúchil. La región contribuye con 2.9% del PIB nacional.

El 90% del agua se extrae de fuentes superficiales en la región y el 10% restante de fuentes subterráneas, del total de agua extraída, 72% es utilizada para fines agropecuarios, 26% para uso público-urbano y 2% para uso industrial. En la región existen 9 distritos de riego con una superficie de más de 806,643 ha. Las subregiones Norte, Centro-Norte y Centro-Sur concentran siete de esos nueve distritos de riego con una extensión que corresponde al 96%.

El escurrimiento natural es de casi 22,519 hm³/año. Se ha construido una importante infraestructura hidráulica con el objeto de adaptarla a las demandas, principalmente las de tipo agrícola. Esta infraestructura es una de las más importantes en el país y cuenta con 16 presas que regulan el agua para riego y abastecimiento público-urbano. Adicionalmente, las presas se utilizan para la generación de energía eléctrica y control de avenidas. Existen 24 acuíferos, de los cuales 2 se encuentran sobreexplotados.

Los principales problemas relacionados con la cantidad y calidad del recurso agua son:

- *Ineficiente uso y manejo del agua en la agricultura.* La eficiencia promedio es menor al 40%.
- *Degradación de la calidad del agua superficial.* Este problema es común en toda la región, principalmente sus mayores efectos se presentan en la subregión Norte, por tener el mayor desarrollo socioeconómico regional, y en la subregión Tuxpan, por su potencial acuícola.
- *Degradación de la calidad del agua subterránea.* Se presenta principalmente en las subregiones Guadiana y Centro-Sur. En el primer caso se presenta contaminación natural por presencia de flúor y arsénico mayor a lo deseable en los acuíferos que abastecen a la ciudad de Durango; la subregión Centro-Sur, el acuífero Presidio, fuente principal de abastecimiento de la ciudad de Mazatlán, presenta contenidos de fierro y manganeso.

- *Insuficiente infraestructura de medición.* Las ciudades principales, Culiacán, Durango y Mazatlán, presentan porcentajes muy elevados de agua potable no contabilizada.
- *Sobreexplotación de acuíferos.* En la subregión Guadiana, la sobreexplotación que presentan los acuíferos Guadiana, Canatlán, Santiaguillo y Vicente Guerrero-Poanas, ha generado un incremento en los costos de bombeo como consecuencia del abatimiento de los niveles del agua de los acuíferos.

Se prevé que para el 2030 la población ascienda a más de 4.5 millones de habitantes. Uno de los mayores retos en la Región III lo constituye el lograr un manejo racional e integral con criterios de sustentabilidad, basados en el uso eficiente del agua.

- RHA IV: Balsas

La Región IV Balsas está conformada por dos grandes provincias fisiográficas: la Sierra Madre del Sur y el eje Neovolcánico. Abarca 116,439 km², 6% del territorio nacional, e incluye completamente al estado de Morelos y parcialmente a los estados de Tlaxcala, Puebla, México, Oaxaca, Guerrero, Michoacán y Jalisco con un total de 420 municipios. La población total de la región es 11,686,789 habitantes, de éstos, más del 70% es población urbana. Las ciudades principales, con más de 50,000 habitantes, son Puebla, Cuernavaca, Uruapan, Cuautla, Chilpancingo y Tlaxcala. Se estima que 6.1% del PIB nacional se genera en esta región.

En la RHA IV, 83% del agua se extrae de fuentes superficiales y el 17% restante de fuentes subterráneas. Del total de agua extraída para usos consuntivos, 68% es para uso agropecuario, 25% para uso público-urbano y 6% para uso industrial. El río Balsas es su principal corriente y fluye a través de una red que drena en dirección este-oeste, paralela a la costa del Océano Pacífico, y desemboca en el delta ubicado en la porción limítrofe entre los estados de Guerrero y Michoacán. Existen 45 acuíferos de los cuales, uno se encuentra sobreexplotado.

Los principales problemas relacionados con la cantidad y calidad del recurso agua son:

- *Baja eficiencia en el uso del agua para riego.* En los 9 distritos de riego, la eficiencia es menor al 40%, mientras que en las unidades es menor al 55%. Este problema se presenta principalmente en las cuencas: Alto Atoyac,

Amacuzac, Cupatitzio y Tepalcatepec. Asimismo, existe abandono de superficies con infraestructura.

- *Saneamiento escaso en el medio rural.* En la porción del estado de Tlaxcala, el saneamiento es del 20%, en la parte del estado de Morelos 29% y en el resto de la región, que abarca parte de los estados de Puebla, México, Oaxaca, Guerrero, Michoacán y Jalisco, sólo alcanza valores del orden de 6%. La gran dispersión de las localidades rurales, principalmente en la subregión Alto Balsas, así como su difícil acceso, son los principales factores que dificultan la dotación de los servicios básicos.
- *Alta contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.* Este problema se presenta en las cuencas Alto Atoyac, Nexapa y Amacuzac. Existe contaminación puntual por los efluentes urbanos e industriales no tratados o con tratamiento deficiente en las principales zonas urbanas.
- *Sobreexplotación de los acuíferos.* Se ha registrado un descenso continuo de los niveles de bombeo con el consecuente encarecimiento de los costos de explotación, situación que representa una amenaza para la preservación de los acuíferos Tecamachalco, Tepalcingo-Axochiapan y Alto Atoyac.

Se estima que para el año 2030, la población ascienda a 12.1 millones de habitantes y de continuar la tendencia actual de manejo del recurso en la región, se acentuará el rezago en los servicios básicos en el medio rural y el limitado saneamiento continuará impactando en la calidad de vida de la población, así como de las aguas superficiales y subterráneas. El incremento en la explotación de los acuíferos de algunas ciudades intensificará la sobreexplotación y competencia entre usuarios agrícolas, población urbana y el sector industrial. Las bajas eficiencias con que operan los distritos de riego y organismos operadores continuarán generando dispendio del recurso, problemas de competencia e incremento en los costos de operación, lo que limitará el desarrollo de diversas actividades productivas.

- RHA V: Pacífico Sur

La Región V Pacífico Sur tiene una superficie de 82,776 km², 4% del territorio. Se integra con 378 municipios de los estados de Oaxaca y Guerrero que abarcan 65% y 35% de la superficie regional. Comprende seis subregiones para fines de planeación hidráulica: Costa Grande, Costa Chica, Río Verde, Costa de Oaxaca, Tehuantepec y Complejo Lagunar, las cuales agrupan a 23 cuencas hidrológicas y sus escurrimientos

se generan desde el parte aguas definido por las sierras Madre Occidental y Madre de Oaxaca, hasta las costas de dichos estados en el Océano Pacífico. En el 2014, la población en la región era de 5,024,088 habitantes, el 59% de la población es urbana y el 41% restante es rural. La región contribuye con 2.3% del PIB nacional.

Los escurrimientos superficiales en la región son 28,629 hm³/año en promedio. Sin embargo, el aprovechamiento de dichos escurrimientos es muy escaso (menos del 5%), debido en gran parte a las fuertes variaciones estacionales de los mismos y a la insuficiente infraestructura de almacenamiento para aprovecharlos. Existen 36 acuíferos que reciben una recarga media de 1,936 hm³/año. Los acuíferos de los Valles Centrales se encuentran en condiciones de equilibrio, esto es vital ya que de ellos depende el abasto de agua para la ciudad de Oaxaca y municipios conurbados donde se asienta una población que asciende a cerca de 600,000 habitantes. De los más de 1,162 hm³/año que se aprovechan en la región para usos consuntivos, 67% provienen de fuentes superficiales y 33% de fuentes subterráneas, y se distribuyen de la forma siguiente: agropecuario 63%, industrial 2% y urbano 35%.

Los principales problemas relacionados con la cantidad y calidad del recurso agua son:

- *Baja eficiencia en el uso del agua en riego.* La Región V Pacífico Sur presenta las eficiencias más bajas en el ámbito nacional (25% en distritos de riego). Alrededor de 50% de la superficie hidroagrícola se encuentra sin utilizar, con lo que se afecta sobre todo al mayor distrito de riego de la región, el 019 Tehuantepec. Diversos factores fuera del ámbito hidráulico causan la situación de baja productividad en el sector agrícola, por ejemplo, por efecto de la insuficiencia de créditos, maquinaria y equipo especializado, los bajos ingresos por la venta de los productos, la alta fragmentación parcelaria y la deficiente organización de los usuarios, entre otros.
- *Degradación de la calidad de los cuerpos de agua.* En ríos como el Atoyac y la Unión, en la subregión Costa Grande, y Papagayo en la subregión Costa Chica, así como en la laguna costera de Tres Palos en la subregión Costa Grande, el índice de calidad del agua (ICA) oscila entre 50 y 55 (100% es un agua en excelentes condiciones). Lo mismo ocurre en las bahías de Puerto Escondido, La Ventosa, la Laguna de Manialtepec y Chacahua en la subregión Costa de Oaxaca. Los ríos Tehuantepec y Los Perros, en las subregiones Tehuantepec y Complejo Lagunar respectivamente presentan un ICA de 60%.

La disminución de la calidad de estos cuerpos de agua se ha propiciado por las descargas indiscriminadas de aguas residuales de origen urbano, industrial y agrícola sin un tratamiento previo, debido a que no existen suficientes plantas para tratar el volumen de aguas residuales generadas.

- *Daños por fenómenos hidrometeorológicos extremos.* La ubicación de la región, aunada a las deficiencias en los sistemas disponibles de observación, previsión y alertamiento, son factores que agravan los daños por ciclones tropicales, afectando principalmente la zona costera.

De acuerdo con las proyecciones de la población, la región podría alcanzar en el año 2030 los 4.4 millones de habitantes. De no llevar a cabo acciones sustantivas en el sector hidráulico en los próximos años, se incrementarán los rezagos existentes en la dotación de los servicios básicos a la población, por lo que se agudizarán problemas como la degradación de la calidad de los principales cuerpos de agua.

- RHA VI: Río Bravo

La superficie total de la Región VI Río Bravo es de 390,440 km² y es la más extensa del país, equivalente al 20% del territorio nacional. La población en la región es de 12,151,555 habitantes repartida en 144 municipios. Los flujos migratorios de la región son principalmente de origen rural hacia los centros urbanos, lo que implica una marcada concentración de la población, básicamente en dos grandes polos de desarrollo: la zona metropolitana de Monterrey, Nuevo León, y Ciudad Juárez, Chihuahua. En la RHA VI el 94% de la población es urbana. El crecimiento económico en la región ha sido constante y contribuye con el 14.3% del PIB, y se ha mantenido un avance continuo de los sectores industrial y de servicios.

La RHA VI cuenta con una importante infraestructura para el riego concentrada en 9 Distritos, que ha beneficiado la actividad agropecuaria al grado de convertirla en un factor fundamental para el desarrollo socioeconómico de la región. La principal corriente es el río Bravo, el cual cuenta con una importante infraestructura hidráulica para regulación, cuya capacidad útil de almacenamiento es de 10,100 hm³, que incluye 3,100 hm³ que le corresponden a México de las presas internacionales La Amistad y Falcón. En la región existen 102 acuíferos en explotación, con una recarga media anual de 5,900 hm³/año, de ellos 18 están sobreexplotados y 8 tienen salinización de suelos y aguas subterráneas salobres. Respecto a la extracción total anual para los diversos usos consuntivos, 54% proviene de fuentes superficiales y

46% de fuentes subterráneas. Se estima que 75% se destina al uso agropecuario, 21% al uso urbano, 2% al uso industrial y 0.2% para uso termoeléctrico.

Los principales problemas relacionados con la cantidad y calidad del recurso agua son:

- *Escasez natural del recurso agua en la región.* La situación de escasez se agudizará en los polos con mayor crecimiento poblacional, tal como sucede con las ciudades de Monterrey, en Nuevo León; Ciudad Juárez y Chihuahua, en el estado de Chihuahua; y la ciudad de Saltillo en Coahuila.
- *Uso ineficiente del recurso agua.* El uso ineficiente del agua agrava la escasez y crea conflictos entre los diferentes grupos de usuarios. Así, en el sector agrícola, que emplea 75% del volumen total para usos consuntivos, se tiene una eficiencia media en los distritos de riego del orden de 34% y en las unidades de riego de 55%. En el sector público urbano, el alto porcentaje de agua no contabilizada representa un desperdicio del recurso agua y merma los recursos financieros de los organismos operadores. El porcentaje de agua no contabilizada oscila entre 40 y 50% en las principales ciudades.
- *Sobreexplotación de los acuíferos.* La sobreexplotación de los acuíferos es una condición inaceptable de extracción de una reserva no renovable. Del orden de 500 hm³/año de sobreexplotación se concentran en los siete acuíferos siguientes: Jiménez-Camargo, Villa Ahumada-Flores Magón, Ascensión, Chihuahua-Sacramento y Cuauhtémoc, en Chihuahua y Saltillo-Ramos Arizpe y Monclova, en Coahuila.

Se estima que para el año 2030, la RHA VI alcanzará una población de 14.8 millones de habitantes, esto será 92% de población urbana. De mantener los patrones de consumo actuales, se incrementará el grado de sobreexplotación y degradación de la calidad del agua de los principales acuíferos, lo que propiciaría una disminución de la disponibilidad y, ocasionará una fuerte competencia por el uso del recurso entre los distintos usuarios.

- RHA VII: Cuencas Centrales del Norte

La Región VII Cuencas Centrales del Norte se ubica en el altiplano de la República Mexicana. Se caracteriza por poseer gran diversidad fisiográfica y muy baja disponibilidad de agua. Abarca una extensión de 187,621 km², el 10% del territorio

nacional. La región está conformada por 78 municipios pertenecientes a los estados de Durango, Zacatecas, Coahuila, San Luis Potosí, Nuevo León y Tamaulipas. Para fines de planeación, fue dividida en cinco subregiones: Mapimí, Nazas, Aguanaval, Comarca Lagunera-Parras y El Salado. La población en el año 2014 era de 4,515,109 habitantes, de los cuales, 67% se localizaba en zonas urbanas y 33% en zonas rurales. La región genera 4.2% del PIB nacional.

La cuenca de captación más importante es la del río Nazas que representa, por sí sola, 53% del escurrimiento medio anual de la región, estimado en 5,529 hm³. La cuenca del río Aguanaval contribuye con 13% del escurrimiento y el restante 34% se pierde por evaporación o se infiltra en el subsuelo. La disponibilidad de agua superficial en la región, con la infraestructura hidráulica de regulación existente, alcanza a un promedio anual de 1,900 hm³.

Se tienen 65 acuíferos en la región, de los cuales 23 están sobreexplotados, entre los que destacan El Principal, Ceballos y San Luis Potosí, y 18 con salinización de suelos y aguas subterráneas salobres. Del volumen total extraído al año, 66% proviene de aguas del subsuelo y 34% de fuentes superficiales. Del volumen total, 82% se utiliza con fines agropecuarios, 14% para usos públicos urbanos y 4% para el uso industrial.

Respecto a la agricultura, el distrito de riego 017, localizado en la subregión Comarca Lagunera-Parras, y el distrito de riego 034, localizado en la subregión Aguanaval, cuentan en conjunto con una superficie de 230,000 ha, con una eficiencia de riego de 35%.

Los principales problemas del recurso agua son:

- *Sobreexplotación intensiva de los acuíferos.* En este rubro la sobreexplotación intensiva de los acuíferos ha provocado el deterioro de la rentabilidad en el sector agropecuario.
- *Degradación de la calidad del agua.* La contaminación puntual en zonas aledañas a San Luis Potosí y Torreón-Gómez Palacio-Lerdo, debida a las descargas urbanas e industriales sin tratamiento, constituyen un riesgo potencial para los mantos acuíferos que son la fuente de abastecimiento de agua potable en estas ciudades. En las áreas agrícolas la extensión del riego con agua residual sin tratar y el uso inadecuado de agroquímicos está propiciando contaminación en los acuíferos como el de la Comarca Lagunera.

Además, aunque de origen natural, se presentan contenidos de arsénico en concentraciones superiores a lo permisible.

- *Competencia por uso del agua.* El crecimiento de las demandas de agua, que ha acompañado al desarrollo socioeconómico, y un uso ineficiente del recurso han propiciado competencia entre los usuarios, lo cual se agudiza, en particular, entre los sectores público urbano y agrícola en la Comarca Lagunera y en el área conurbada de San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez, esencialmente en los recursos de agua subterránea. En los distritos agrícolas se riega con una eficiencia de 40%, mientras que en las unidades se riega con una eficiencia de 60%.

Se espera que para el año 2030 la población sea de 4.2 millones de habitantes de los cuales más del 70% se ubicará en núcleos urbanos. De no tomarse las medidas apropiadas dicha degradación continuará y, por consiguiente, el deterioro económico-ambiental será crítico. La reducción del bombeo y el uso eficiente del agua son indispensables para frenar el deterioro de los acuíferos.

- RHA VIII Lerma Santiago-Pacífico

La Región Hidrológica Administrativa VIII, Lerma-Santiago-Pacífico, está conformada por los estados de Colima, Aguascalientes, Nayarit, Querétaro, Estado de México, Jalisco, Guanajuato, Michoacán y Zacatecas. En conjunto incluyen 332 municipios con jurisdicción política en la región. Destacan los últimos cuatro estados, ya que abarcan 82% de la superficie regional. La RHA VIII comprende las cuencas de los ríos Lerma y Santiago, así como una porción importante de la costa del Océano Pacífico correspondiente a los estados de Jalisco y Michoacán. La superficie total de la región es de 193,120 km², 10% del total nacional. Con una densidad de 124 habitantes por km², la región tenía en el año 2014 un total de 23,888,024 de habitantes. En la región se localizan importantes núcleos urbanos, entre los que destacan Guadalajara, León, Aguascalientes, Morelia, Querétaro, Toluca e Irapuato. La región aporta 19.1% del PIB.

El escurrimiento natural medio en la región es de 25,423 hm³/año y la recarga es de 9,670 hm³/año. En las subregiones Alto, Medio y Bajo Lerma, así como en Alto Santiago, la oferta natural del recurso es menor que la demanda, situación contraria a la que ocurre en las subregiones Costa de Jalisco y Bajo Santiago donde se presenta el mayor escurrimiento de la región. Del total de agua extraída para usos consuntivos,

49% proviene de fuentes superficiales y 51% de subterráneas. Entre los usos consuntivos, 76% corresponden al agropecuario, 20% al público urbano y 5% al industrial. Existen en la región 128 acuíferos en explotación intensiva, de los cuales 32 se encuentran sobreexplotados.

La capacidad de regulación alcanza un valor cercano a los 15,000 hm³/año mediante presas, sobresaliendo las de Aguamilpa con 7,000 hm³ y Solís con 800 hm³, además del Lago de Chapala con un almacenamiento de 4,500 hm³.

La superficie regional con infraestructura para riego es de 1,252,000 ha., que equivalen a 20% del total nacional. 70% de esta superficie se atiende con 16,000 unidades de riego para el desarrollo rural, cuya operación, mantenimiento y administración están a cargo de los propios productores. El 30% restante se ubica en los distritos de riego existentes.

Los principales problemas del recurso agua son:

- *Oferta insuficiente para satisfacer las demandas.* Existe oferta insuficiente para satisfacer las demandas en las subregiones Alto, Medio y Bajo Lerma y Alto Santiago, que deriva en una fuerte competencia tanto por las aguas superficiales como subterráneas, agotamiento de los recursos existentes y la degradación del medio ambiente.
- *Sobreexplotación de acuíferos.* A efecto de complementar los volúmenes de aguas superficiales y con el objeto de satisfacer las demandas de agua de los diferentes usos en cada subregión, durante décadas se ha dado una explotación intensiva del agua subterránea, la cual ha sido uno de los factores esenciales en el desarrollo socioeconómico de la región.
- *Baja eficiencia en el aprovechamiento del agua.* Se ha detectado una baja eficiencia en el aprovechamiento del agua y en la infraestructura del sector agrícola. Este entorno existe por insuficiente tecnificación de riego y capacitación de los agricultores, así como por un mal estado de la infraestructura de conducción y distribución. La eficiencia de riego se estima en 39% en los distritos de riego y en 56% en las unidades de riego. Además, existe un importante porcentaje de superficie que cuenta con infraestructura pero es del tipo ociosa (30% en los distritos de riego y 15% en las unidades de riego).

- *Degradación de la calidad del agua.* Este problema se presenta prácticamente en toda la región, ya que la infraestructura de tratamiento es insuficiente, lo que deriva en problemas de salud pública, limitación de la disponibilidad y, en el caso de los cuerpos de agua principales, un proceso de eutrofización que estimula la proliferación de malezas acuáticas.

De acuerdo con las proyecciones de la población, la región podría alcanzar en el año 2030 los 23.7 millones de habitantes. De no implantarse acciones sustentables, la problemática del agua tenderá a agudizarse y las actividades económicas que sustenta el agua se verán afectadas; la superficie abandonada se incrementará, la degradación de la calidad del agua aumentará y se convertirá en un problema de salud pública.

- RHA IX: Golfo Norte

La RHA IX Golfo Norte se localiza en la vertiente del Golfo de México. La región abarca una superficie de 127,065 km², que representan 6% del territorio nacional y está conformada por 148 municipios de ocho entidades. En el 2014 la población ascendió a 5,233,402 habitantes, de los cuales 49% habitaba en comunidades rurales, y el restante 51% en ciudades medias y grandes. El PIB generado en la región es del orden de 2.2% del PIB nacional.

El escurrimiento medio anual en la región es de 24,016 hm³, de los cuales una parte proviene del río Tula, afluente del río Pánuco, que conduce aguas residuales del Valle de México y la otra del escurrimiento natural generado por la propia cuenca. Para regularizar y aprovechar dichos volúmenes, que presentan una fuerte variación tanto estacional como interanual, se ha construido una importante infraestructura hidráulica que incluye 17 presas con una capacidad de almacenamiento total de 7,100 hm³. Destaca la presa Vicente Guerrero con capacidad de 3,900 hm³, localizada en la cuenca del río Soto la Marina, en contraste existen 11 presas que tienen una capacidad menor a los 100 hm³.

Se tienen identificados 40 sistemas acuíferos en la región, los cuales tienen una recarga media anual de 2,569 hm³. Los acuíferos Huichapan-Tecoautla, Valle de Tulancingo y Valle de San Juan del Río se encuentran sobreexplotados. En esta región, 18% del agua se extrae de las fuentes subterráneas y 82% de fuentes

superficiales. De los más de 4,569 hm³ de agua concesionada, 67% se destina para uso agropecuario, 22% para uso público urbano y 10% para uso industrial.

Los principales problemas relacionados con la cantidad y calidad del recurso agua son:

- *Uso ineficiente del agua para uso agrícola.* El mantenimiento insuficiente a la infraestructura hidroagrícola de los distritos y unidades de riego ocasiona el uso de volúmenes excesivos de agua y bajas eficiencias, las cuales se estiman del orden de 45% en distritos de riego. Además, casi una tercera parte de la superficie con infraestructura se encuentra sin utilizar.
- *Degradación de la calidad del agua.* El saneamiento casi nulo ha propiciado que la calidad de los cuerpos receptores de agua se haya degradado, principalmente en las zonas cercanas a los grandes centros de desarrollo.
- *Sobreexplotación de acuíferos.* Los acuíferos de la región presentan diferentes grados de sobreexplotación, los más significativos son: Valle de San Juan del Río y Tequisquiapan, en Querétaro, Valle de Tulancingo, Huichapan-Tecoautla y Zimapán, en Hidalgo, y Cerritos-Villa de Juárez en San Luis Potosí.

De acuerdo con las proyecciones de la población, la región podría alcanzar en el año 2030 los 5.6 millones de habitantes. La baja cobertura en los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento reduce la posibilidad de contribuir y mejorar la calidad de vida de la población que no cuenta con estos servicios, y propicia la degradación del medio ambiente, principalmente de los cuerpos de agua, situación que se complica por las descargas de aguas residuales sin tratamiento provenientes de las diferentes industrias de la región. De continuar esta situación, con las tendencias actuales aumentará el riesgo de que se generen problemas de salud y se limitará el desarrollo económico regional, escenario que se agravará si se mantienen las actuales prácticas de consumo de agua.

- RHA X: Golfo Centro

La Región X constituye gran parte de la vertiente mexicana del Golfo de México, posee grandes recursos naturales, entre los que destaca su escurrimiento natural, de alrededor 90,424 hm³/año. Cubre una extensión de 102,354 km², 5% del territorio nacional. Se integra con 432 municipios. De los 10,482,417 habitantes que habitaban

en la región en el año 2014, el 58% es población urbana y el 42% es población rural. A lo largo del territorio regional existen más de 23,500 localidades. Se genera un PIB del orden de 5.6% del nacional.

Existen en la región 22 acuíferos, con una recarga media de 4,705 hm³/año. En esta región, 74% del agua se extrae de las fuentes superficiales y 26% de fuentes subterráneas. La extracción para usos consuntivos es de cerca de 4,041 hm³, de los cuales, 63% se destina a riego agropecuario, 18% a uso público urbano y 19% a la industria.

Los principales problemas relacionados con el recurso agua son:

- *Contaminación de las corrientes superficiales.* Este problema se presenta de manera generalizada en la región debido a las descargas de aguas municipales e industriales sin tratamiento.
- *Infraestructura hidroagrícola desaprovechada y baja eficiencia en riego.* En el caso de los distritos de riego de la región se ha estimado que la eficiencia es del 32%. Esta problemática se relaciona con el uso ineficiente del agua, provocado por el mal estado de la infraestructura de distribución y drenaje, así como por prácticas inadecuadas de riego y baja eficiencia de los equipos de bombeo.

Se estima que para el año 2030, la Región X alcanzará una población de 10.4 millones de habitantes. De persistir las tendencias antes señaladas, la región manifestará condiciones críticas ambientales en las cuencas hidrológicas que la conforman. Un elemento básico será la contaminación del río Papaloapan, la cual disminuirá las coberturas de agua potable en las subregiones Norte Papaloapan, Medio Papaloapan y Coatzacoalcos, y asimismo, seguirán los daños por inundaciones en las subregiones Bajo Papaloapan y Coatzacoalcos.

- RHA XI: Frontera Sur

La Región XI Frontera Sur está conformada por la totalidad de los estados de Chiapas y Tabasco, así como por áreas pequeñas de los estados de Campeche y Oaxaca. Tiene una superficie de 99,094 km² y representa el 5% del territorio nacional. En el 2014 alcanzó una población de 7,571,983 habitantes, y en ella se ubican ciudades de más de 50,000 habitantes, como Villahermosa y Cárdenas en Tabasco, Tapachula,

Tuxtla Gutiérrez, San Cristóbal de las Casas y Comitán de Domínguez en Chiapas; y más de 15,000 localidades rurales dispersas, 80% en Chiapas, que alojan más del 50% de los habitantes de la región, lo que dificulta el suministro de servicios. La actividad económica regional participa con solo 4.9% del PIB nacional.

Para fines de planeación hidráulica, la región se dividió en ocho subregiones: Costa de Chiapas, Alto Grijalva, Bajo Grijalva-Sierra, Bajo Grijalva-Planicie, Medio Grijalva, Usumacinta, Lacantún-Chixoy y Tonalá-Coatzacoalcos, a excepción de la Planicie Tabasqueña; la Costa de Chiapas, donde se localiza la ciudad de Tapachula; la depresión central del mismo estado, donde se ubica la ciudad de Tuxtla Gutiérrez y los Altos de Chiapas, donde se ubica San Cristóbal de las Casas, la región presenta serios rezagos: 44% de la población se encuentra en condiciones de alta marginalidad.

Con cerca de 121,742 hm³/año, es la región que presenta el mayor escurrimiento del país, 36% del total; incluye cerca de 50,000 hm³ de agua al año proveniente de la República de Guatemala. En cuanto a las aguas del subsuelo, los 23 acuíferos identificados son alimentados con una recarga anual de 22,718 hm³/año.

Para usos consuntivos, del total de agua que se extrae, 70% del agua se extrae de las fuentes superficiales y 30% de fuentes subterráneas; 70% se destina a la agropecuario, 24% para el uso público urbano y 6% para la industria.

En la región se aprovecha una cantidad de 42,500 hm³/año para la generación de energía eléctrica mediante siete plantas hidroeléctricas, todas ubicadas en el estado de Chiapas, con una capacidad instalada de más de 3,900 MW, lo que representa 39% de la capacidad hidroeléctrica del país.

Los principales problemas del recurso agua son:

- *Bajo aprovechamiento y manejo deficiente del agua superficial.* Se cuenta con una vasta superficie de más de 1.7 millones de ha. para la producción agrícola. Sin embargo, 98% están destinadas a cultivos de temporal. Existen cuatro distritos de riego con eficiencias inferiores a 40% en promedio, ubicados uno de ellos en la subregión Costa de Chiapas y los tres restantes en la subregión Alto Grijalva los cuales, en conjunto, cuentan con una superficie dominada de 16,680 hectáreas. Asimismo, se tienen unidades de riego dispersas con una superficie de 69,900 ha. y siete distritos de temporal tecnificado ubicados,

cuatro de ellos, en la subregión Costa de Chiapas y los otros tres restantes en las subregiones Coatzacoalcos, Bajo Grijalva-Sierra y Alto Grijalva. Para las unidades de riego se estima una eficiencia de 54%.

- *Contaminación de corrientes superficiales.* La contaminación de corrientes superficiales se presenta en especial en la subregión Costa de Chiapas, en donde no existen sistemas de tratamiento para las aguas residuales generadas por descargas urbanas y rurales procedentes, principalmente, de la ciudad de Tapachula y que afectan a lagunas costeras y esteros. En la subregión Medio Grijalva se presenta contaminación del río Grijalva en su tramo La Angostura-Chicoasén, originada por descargas sin tratamiento de las localidades de Tuxtla Gutiérrez, San Cristóbal de las Casas y Chiapa de Corzo principalmente, condición que la ubica como una corriente contaminada que afecta las actividades turísticas y recreativas del Cañón del Sumidero. En la actualidad, se encuentran en construcción las plantas de tratamiento para Tuxtla Gutiérrez, Chiapa de Corzo y Acalá, pero falta por definir los mecanismos de financiamiento para su operación y autosuficiencia.

Se estima que para el año 2030 la población ascenderá a 8.2 millones de habitantes, de los cuales, más del 54% se ubicará en zonas urbanas. La situación específica de la región con relación al resto de las regiones del país se caracteriza por ser una de las zonas con mayores rezagos sociales; sus niveles de coberturas de agua potable, alcantarillado y saneamiento son muy bajos y existe una degradación acelerada del medio ambiente y una vulnerabilidad ante la ocurrencia de ciclones tropicales en las zonas bajas.

- RHA XII: Península de Yucatán

La región abarca una superficie de 140,870 km², lo que representa 7% de la superficie. Para el año 2014 su población era de 4,515,526 habitantes, la población urbana representaba 83% y 17% restante la población rural. El PIB de la región representa 7.4% del nacional.

Prácticamente toda la península está ocupada por formaciones de calizas y dolomitas altamente permeables, cuya recarga es de 25,316 hm³/año. El abastecimiento actual y futuro depende esencialmente de los recursos de agua subterránea, los cuales son altamente vulnerables a todo tipo de contaminación, principalmente antropogénica, lo que requiere una extracción cuidadosa para evitar su salinización. Existen en la región

cuatro acuíferos, de los cuales uno tiene salinización de suelos y aguas subterráneas salobres. En el ámbito regional la recarga media es de 25,316 hm³/año.

Se emplean en total cerca de 3,957 hm³/año en los principales usos consuntivos: 70% en el uso agropecuario, 15% para el abastecimiento público y 15% para la industria. El 97% del agua empleada proviene de los acuíferos.

Los principales problemas relacionados el recurso agua son:

- *Contaminación del acuífero por descargas de aguas residuales.* La falta de drenaje sanitario apropiado ha producido la infiltración de descargas residuales. Puesto que el acuífero es la fuente preponderante de abastecimiento de agua de la región, su contaminación es un problema que afecta en mayor medida a las comunidades rurales debido a que, en general, no cuentan con sistemas apropiados de tratamiento del agua para consumo humano.
- *Degradación de la calidad del agua por mal manejo en su extracción.* El desarrollo turístico de la región ocurre principalmente en las zonas costeras, áreas en las que se concentra la demanda y, por ende, requiere la extracción de agua del subsuelo para satisfacerla, por lo que debe tenerse especial cuidado en su explotación, tomando en cuenta la vulnerabilidad de los mantos acuíferos, en primer instancia en Ciudad del Carmen, en Campeche, y Cancún, Cozumel y Chetumal, en Quintana Roo.
- *Deficiente servicio de agua potable en zonas urbanas y rurales.* La problemática de este servicio está relacionada, por un lado, con el bajo nivel de cobertura, en especial en las zonas rurales y, por otro lado, que los sistemas existentes presentan deficiencias tanto en la operación como en su mantenimiento.
- *Desarrollo agrícola incipiente.* Existen múltiples obras fuera de servicio, abandonadas o sin equipamiento agroindustrial. Los sistemas de riego son ineficientes y sólo operan de manera parcial 55% de las unidades de riego y en muchos casos se ha cambiado el uso del suelo agrícola a ganadería extensiva. Estos problemas se deben tanto a la carencia de apoyos económicos, como de capacitación en la operación y conservación de las obras. En los distritos de riego se siembra solamente 64% de la superficie regable con una eficiencia global de 46%.

- *Degradación de los humedales de la región.* Los humedales constituyen un patrimonio ambiental de gran importancia, tanto regional como internacional; son también el sustento de muchas comunidades rurales que habitan en la región, por lo que su degradación repercute tanto en los ecosistemas como en la economía de los habitantes. Se ven afectados, en primer lugar, por la construcción de obras de infraestructura y desarrollos residenciales.

Se estima que para el año 2030 la población será de 5.4 millones de habitantes, de los cuales más del 80% se ubicará en zonas urbanas. De continuar con la tendencia actual con relación al cuidado y preservación del recurso agua, se incrementará la problemática de contaminación de las aguas subterráneas, continuará la deficiente calidad de los servicios y avanzará la degradación de los humedales en la franja que abarcan los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo.

- RHA XIII: Aguas del Valle de México

La región ocupa una superficie de 18,229 km² e incluye el Distrito Federal, el Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala. Esta región ocupa menos del 1% del territorio nacional. En 2014 contaba con 23,005,142 habitantes, 20% de la población nacional; 96% es población urbana y genera 24.5% del PIB nacional.

El escurrimiento medio anual en la región es 1,112 hm³, incluyendo las aguas residuales que generan los habitantes del Valle de México. La región cuenta con 14 acuíferos, de los cuales 4 están sobreexplotados. Con relación a la infraestructura hidráulica, en la región existen 106 almacenamientos con una capacidad total de 659 hm³; en la subregión Valle de México se encuentra el 67% de las obras. Sin embargo, en la subregión Tula se tiene el 76% de la capacidad de almacenamiento.

En esta región, 51% del agua se extrae de las fuentes superficiales y 49% de fuentes subterráneas. Los principales usos en la región son el agrícola y el público urbano, ya que utilizan 24 y 70% de la disponibilidad del recurso hídrico, respectivamente. La cobertura de servicios de agua potable y alcantarillado es superior a la media nacional, principalmente por la importancia que tiene la zona metropolitana.

Respecto al aprovechamiento de agua para fines agrícolas, en la región existen casi 140,000 ha bajo riego, correspondientes a 5 distritos y 700 unidades de riego. El 63%

de sus requerimientos se satisfacen con agua residual sin tratamiento. Cabe mencionar que 34% de la superficie agrícola total es de temporal.

Los principales problemas relacionados con el recurso agua son:

- *Sobreexplotación de los acuíferos.* La condición de sobreexplotación, en la subregión Valle de México, se presenta en forma global, con una extracción total que excede en 140% la magnitud de la recarga.
- *Contaminación de las fuentes de agua superficial y subterránea.* La cuenca del río Tula es la más afectada por ser receptora de las aguas residuales provenientes de la zona metropolitana, de las cuales el 60% es agua residual cruda y el 40% restante es de origen pluvial. Los principales ríos que se encuentran contaminados son: Tula, Tepeji, Salado, El Salto y Alfajayucan.
- *Infraestructura para riego con falta de mantenimiento.* Este problema se ve reflejado en la baja eficiencia de los distritos y unidades de riego. La mayoría de los canales de los distritos de riego no están revestidos, esta situación produce bajas eficiencias en la conducción y pérdidas por infiltración y, por consiguiente, el suministro de agua para riego resulta insuficiente.
- *Competencia por el uso del agua.* El desarrollo de la agricultura y el empleo de aguas residuales en la región han crecido de manera significativa. El reúso del agua residual para fines industriales y público también ha aumentado. Lo anterior genera competencia por el aprovechamiento tanto del agua de primer uso, como del agua residual. A pesar de los enormes esfuerzos que el país ha dedicado a la región y en particular a la zona metropolitana, la situación hidráulica es crítica y la región es sumamente vulnerable a cambios en la disponibilidad de agua.

Se estima que para el año 2030, la región alcanzará una población de 24.7 millones de habitantes. El crecimiento poblacional y la actividad económica seguirán generando cuantiosas demandas adicionales de agua en la región y, de continuar con las tendencias actuales de consumo y la contaminación de los cuerpos receptores, se acrecentará la degradación del medio natural y las actuales fuentes de abastecimiento serán insuficientes, lo que ocasionará mayores problemas para el suministro a los diferentes usos y limitaciones en el desarrollo económico.

Con base en el diagnóstico anterior, se reconoce que México enfrenta una situación crítica de disponibilidad de agua, en la que las causas y efectos se relacionan con la

sobreexplotación de acuíferos, el limitado tratamiento de las descargas municipales e industriales, entre otros aspectos. La disponibilidad de agua se reconoce como uno de los principales problemas para alcanzar la sustentabilidad en México (Jiménez *et al.*, 2010).

En todo el país, el principal consumidor del agua es el sector agropecuario con 76.3%, le sigue el abastecimiento público con 14.6%, la energía eléctrica con 4.8% y la industria autoabastecida con 4.3%. Un cuarto sector no considerado por las estadísticas de CONAGUA son los sistemas ecológicos. En los últimos 20 años la productividad del sector agrícola ha aumentado, pero ha crecido menos rápido que la demanda, dando lugar al aumento de las importaciones (Palerm *et al.*, 2010; Arreguín *et al.*, 2011). En la medida que aumenta la población y las actividades productivas, la competencia por el agua se agudiza, particularmente en las regiones con baja disponibilidad. En resumen, un primer listado de los principales factores relacionados con la vulnerabilidad de las RHAs ante sequía son:

- Sobreexplotación de acuíferos
- Grado de presión sobre el recurso hídrico
- Contaminación de agua superficiales y subterráneas
- Demanda creciente de agua para ciudades
- Disponibilidad media per cápita
- Uso y manejo del agua en la agricultura
- Insuficiente reúso del agua
- Baja eficiencia de los sistemas de agua potable
- Suministro de agua potable y alcantarillado insuficiente
- Infraestructura de almacenamiento insuficiente y deteriorada
- Baja capacidad de las plantas potabilizadores y/o de tratamiento
- Insuficiente infraestructura de medición
- Tarifas/recaudación por uso o aprovechamiento de agua inadecuadas
- Fugas de agua en los sistemas de distribución de agua en ciudades
- Alta competencia entre los usos del agua
- Saneamiento escaso en el medio rural
- Bajo aprovechamiento y mal manejo del agua superficial
- Degradación de los ecosistemas (sistemas riparios, humedales, etc.)
- Mayor extracción total que recarga de numerosos acuíferos

3.2.2 Etapa 2: Estimación de la vulnerabilidad

Los problemas anteriores resultan en causas de vulnerabilidad frente a una situación de sequía meteorológica. Mediante datos de CONAGUA, para el periodo 2002 al 2014, es posible representar su dinámica para años recientes y analizar la tendencia de cambio. Con base en la disponibilidad de datos se definieron 6 indicadores:

- 1) Grado de presión sobre el recurso agua,
- 2) Porcentaje de acuíferos sobreexplotados y con intrusión salina,
- 3) Proporción de agua pública residual tratada con respecto del agua urbana consumida,
- 4) Tarifa óptima de consumo de agua en ciudades,
- 5) Productividad del agua en agricultura y,
- 6) Capacidad de almacenamiento de agua en presas.

Los indicadores seleccionados (Tabla 4) reflejan el manejo que se hace del sistema, pero al mismo tiempo abren la posibilidad de sugerir cambios orientados a reducir la vulnerabilidad. Por ello, se seleccionaron aspectos relacionados con la gestión del agua, el crecimiento poblacional, las demandas de agua, el uso de agua urbana, elementos económicos, de infraestructura, y aquellos en los que es posible incidir mediante acciones de las cuales es posible cuantificar su impacto en los índices de vulnerabilidad.

Los datos convertidos en indicadores resultan de normalizar, entre 0 y 1 las cifras de CONAGUA. En algunos casos, el valor del indicador fue obtenido con respecto de un valor máximo considerado óptimo. Por ejemplo, en el caso del grado de presión, la RHA XIII presenta un valor máximo de 1.52, por lo que se definió como valor máximo 2. En el caso del indicador de la proporción de agua pública residual tratada con respecto del agua urbana consumida, se invirtió el valor máximo para referirse a 1 como vulnerable cuando la proporción de agua tratada es mínima. Finalmente, los indicadores se promediaron para obtener el índice de vulnerabilidad del recurso hídrico por RHA. La formulación del índice de vulnerabilidad permite hablar de vulnerabilidad baja ante la sequía meteorológica, cuando el valor del índice es 0 a 0.3 y vulnerabilidad alta, cuando está entre 0.7 y 1. Los datos originales y su versión normalizada se presentan en el Anexo I.

Tabla 4. Indicadores de vulnerabilidad de las RHAs ante sequías

Indicador	Definición	Fórmula	Valores máximos y mínimos
Grado de presión sobre el recurso agua (GP)	Proporción del agua empleada en usos consuntivos con respecto al agua disponible	$GP = \text{volumen total de agua concesionada} / \text{volumen de agua renovable media}$	Máx. = 2 Min. = 0
Acuíferos contaminados (AC)	Porcentaje de acuíferos sobreexplotados y con problemas de intrusión salina	$AC = \text{número de acuíferos sobreexplotados y con intrusión salina} / \text{número total de acuíferos}$	Máx. = 1 Min. = 0
Agua municipal tratada (AT)	Proporción de agua residual municipal tratada comparada con el volumen usado para abastecimiento público urbano	$AT = 1 - (\text{volumen de agua pública residual tratada} / \text{volumen de agua concesionada para abastecimiento público urbano})$	Máx. = 1 Min. = 0
Tarifa óptima de consumo de agua en ciudades (TO)	Tarifas de agua potable en ciudades (representativas por RHA) comparada con un precio óptimo de 32.5 pesos/m ³ (OECD, 2009)	$TO = 1 - (\text{tarifa de agua en ciudades} / 32.5 \text{ pesos/m}^3)$	Máx. = 32.5 Min. = 0
Productividad del agua (PA)	Relación entre el precio medio rural con respecto al agua utilizada (m ³) usada para producir una tonelada	$PS = 1 - (\text{precio medio rural} / (\text{total de agua usada} / \text{productividad en la agricultura}))$	Máx. = 12 Min. = 0
Capacidad de almacenamiento de presas (AP)	Proporción de la capacidad de almacenamiento de agua en presas respecto al agua concesionada	$AP = 1 - (\text{volumen almacenado en presas (1)} / \text{volumen total de concesionada usada (2)})$ <i>Donde:</i> (1)= (% volumen anual de almacenado x volumen máximo de almacenamiento (NAMO)) / 100%) (2)= (volumen total de agua concesionada X % fuente del agua)	Máx. = 10 Min. = 0

Los resultados de la valoración de la vulnerabilidad del sector hídrico ante sequía meteorológica para cada una de las RHA definida a través de los indicadores descritos, permiten contrastar la condición de las diferentes regiones en su nivel de preparación para enfrentar déficit de lluvia. La tendencia de los indicadores en el pasado reciente, así como sus fluctuaciones permiten analizar si la vulnerabilidad para está aumentando o disminuyendo, con qué facilidad cambia interanualmente, y en qué medida esto puede estar resultando en impactos más serios como sequía hidrológica o agrícola.

Del diagnóstico de vulnerabilidad de las RHAs se concluyó que el máximo nivel de vulnerabilidad ante sequía meteorológica se tiene en la RHA XIII Valle de México con un índice promedio de 0.72 (Fig. 8), mientras que la menos vulnerable ante esta condición climática es la RHA XII Frontera Sur, con un índice de vulnerabilidad de sólo 0.36.

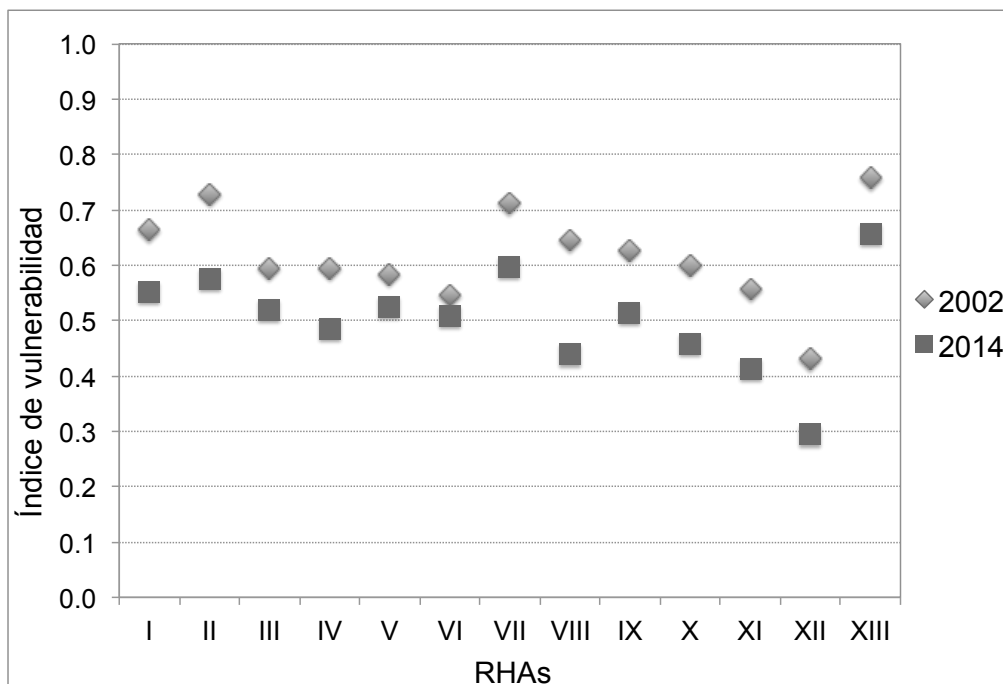


Figura 8. Índice compuesto de vulnerabilidad del sector hídrico (en 2002 y 2014) ante sequías.

Como elemento dinámico, la vulnerabilidad de las RHAs ha cambiado en el tiempo, y gracias al monitoreo de CONAGUA es posible estimar con qué rapidez aumenta o disminuye. En términos generales la vulnerabilidad ha disminuido en todas las RHAs entre el 2002 y el 2014 (Tabla 5). La evolución de la vulnerabilidad en el tiempo puede interpretarse como el conjunto de acciones continuas que se realizan en las RHAs, o la decisión en un momento dado de cambiar una práctica, hacer una obra de infraestructura, o cambiar los esquemas de manejo del recurso. Una acción concreta, como lo es el incrementar el reúso de agua o la productividad del uso de agua en la agricultura, es significativa para reducir la vulnerabilidad. Sin embargo, el sentido es mostrar que se requieren de diversas acciones para ver un cambio significativo en la reducción de la vulnerabilidad.

El índice de vulnerabilidad ante sequías meteorológicas (valor promedio en línea negra) para la RHA I muestra que del 2002 al 2014 la vulnerabilidad disminuyó debido a que los indicadores de productividad de agua en la agricultura y tarifa óptima

mejoraron lo que disminuyó dicho indicador de vulnerabilidad, colocándolos en niveles de vulnerabilidad media-baja. El indicador de agua tratada presentó una disminución significativa en el 2009, pero en los años posteriores aumentó. Su indicador de acuíferos contaminados aumentó y el de almacenamiento en presas no presentó cambios significativo, permaneciendo en el nivel más alto de vulnerabilidad (Figura 9).

Tabla 5. Evolución entre 2002 y 2014 del índice promedio de vulnerabilidad a la sequía en las 13 RHAs

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	IV
I	0.66	0.65	0.64	0.63	0.60	0.58	0.57	0.51	0.55	0.56	0.56	0.55	0.55	0.59
II	0.73	0.73	0.71	0.70	0.70	0.69	0.67	0.66	0.65	0.66	0.61	0.59	0.58	0.67
III	0.59	0.59	0.56	0.57	0.56	0.56	0.56	0.55	0.55	0.58	0.53	0.52	0.52	0.56
IV	0.59	0.58	0.59	0.59	0.58	0.60	0.59	0.57	0.55	0.54	0.54	0.53	0.48	0.56
V	0.58	0.57	0.57	0.56	0.56	0.58	0.57	0.53	0.52	0.53	0.53	0.52	0.53	0.55
VI	0.55	0.59	0.55	0.57	0.57	0.56	0.53	0.54	0.52	0.54	0.54	0.51	0.51	0.54
VII	0.71	0.65	0.64	0.63	0.61	0.63	0.61	0.60	0.59	0.59	0.59	0.59	0.60	0.62
VIII	0.65	0.63	0.61	0.61	0.59	0.55	0.54	0.52	0.49	0.48	0.46	0.47	0.44	0.54
IX	0.63	0.60	0.61	0.60	0.60	0.58	0.57	0.56	0.50	0.52	0.53	0.54	0.51	0.57
X	0.60	0.57	0.57	0.54	0.54	0.57	0.56	0.50	0.49	0.47	0.45	0.45	0.46	0.52
XI	0.56	0.54	0.53	0.51	0.50	0.49	0.50	0.50	0.47	0.43	0.44	0.41	0.41	0.48
XII	0.43	0.42	0.41	0.40	0.39	0.38	0.39	0.39	0.34	0.31	0.27	0.30	0.29	0.36
XIII	0.76	0.75	0.74	0.74	0.76	0.78	0.75	0.75	0.69	0.68	0.65	0.66	0.65	0.72

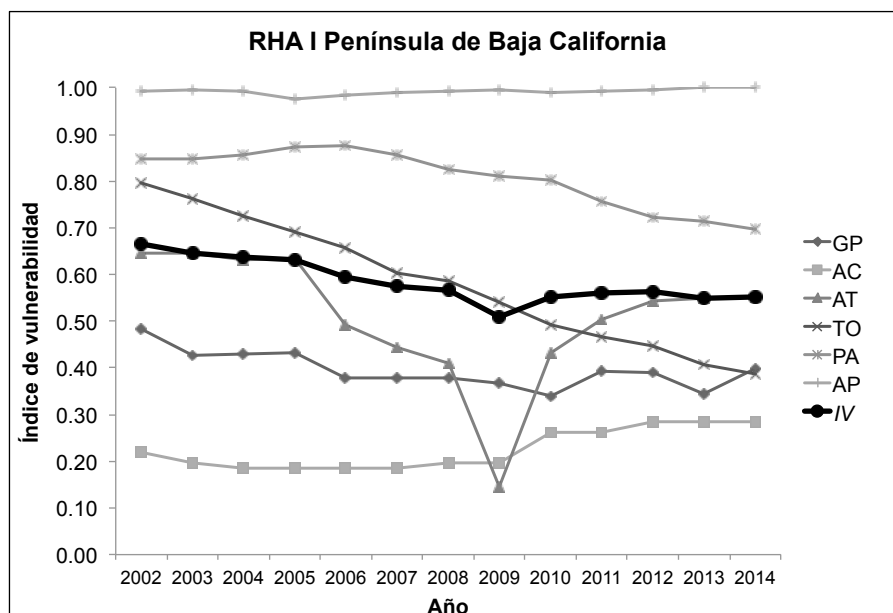


Figura 9. Índice de vulnerabilidad para la RHA I.

GP = grado de presión sobre el recurso agua; AC = acuíferos contaminados; AT = agua pública residual tratada con respecto del agua urbana consumida; TO = tarifa óptima de consumo de agua en ciudades; PA = productividad del agua en agricultura y AP = almacenamiento de agua en presas; línea negra = índice de vulnerabilidad promedio.

El índice de vulnerabilidad ante sequías meteorológicas (valor promedio en línea negra) para la RHA II muestra que del 2002 al 2014 la vulnerabilidad disminuyó considerablemente, esto es debido a que la mayoría de los indicadores disminuyeron, en particular los de productividad agua en la agricultura y almacenamiento en presas, pasando a niveles de vulnerabilidad media. Los indicadores de vulnerabilidad por agua tratada y tarifa óptima disminuyeron, pero se mantuvieron en niveles altos, mientras que el indicador de acuíferos contaminados se mantuvo en un nivel de vulnerabilidad baja. Sin embargo, el grado de presión tuvo un ligero aumento aunque se mantuvo en el nivel medio (Figura 10).

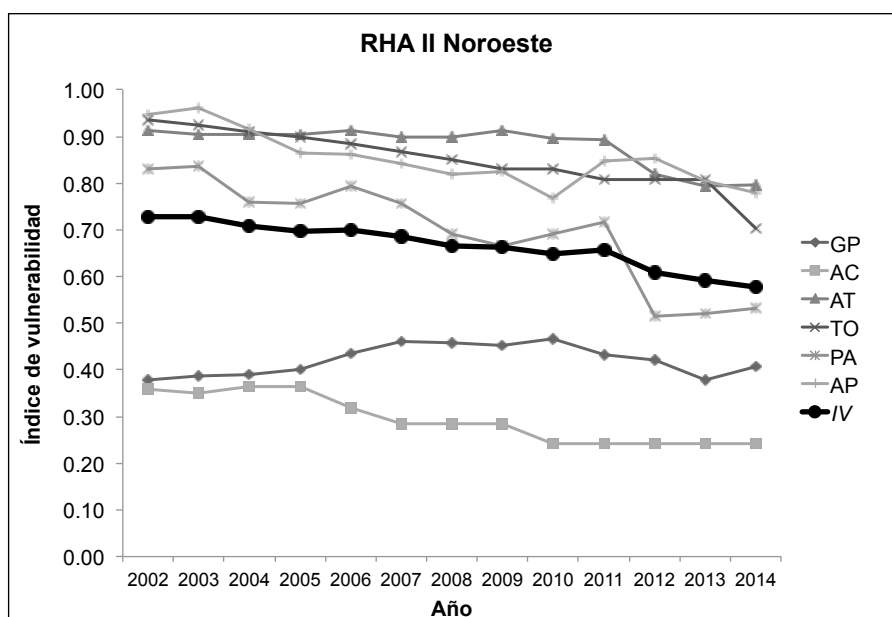


Figura 10. Índice de vulnerabilidad para la RHA II.

GP = grado de presión sobre el recurso agua; AC = acuíferos contaminados; AT = agua pública residual tratada con respecto del agua urbana consumida; TO = tarifa óptima de consumo de agua en ciudades; PA = productividad del agua en agricultura y AP = almacenamiento de agua en presas; línea negra = índice de vulnerabilidad promedio.

El índice de vulnerabilidad ante sequías (valor promedio en línea negra) para la RHA III muestra que del 2002 al 2014 la vulnerabilidad disminuyó ligeramente, esto es debido a que los indicadores de productividad del agua en agricultura y tarifa óptima disminuyeron, el primero de ellos significativamente, el indicador de almacenamiento en presas se mantuvo en niveles de vulnerabilidad alta, mientras que los indicadores de agua tratada, grado de presión y acuíferos contaminados muestran cambios leves, los dos últimos permanecieron en niveles de vulnerabilidad baja (Figura 11).

El índice de vulnerabilidad ante sequías (valor promedio en línea negra) para la RHA IV muestra que del 2002 al 2014 la vulnerabilidad disminuyó considerablemente, esto es debido a que el indicador de tarifa óptima mejoró, pasando a niveles de

vulnerabilidad baja, sin embargo, los indicadores de productividad del agua en agricultura, almacenamiento en presas y agua tratada se mantuvieron en niveles de vulnerabilidad alta, mientras que el indicador de grado de presión aumento y el acuíferos contaminados no presento cambios significativos, manteniéndose ambos en niveles de vulnerabilidad baja (Figura 12).

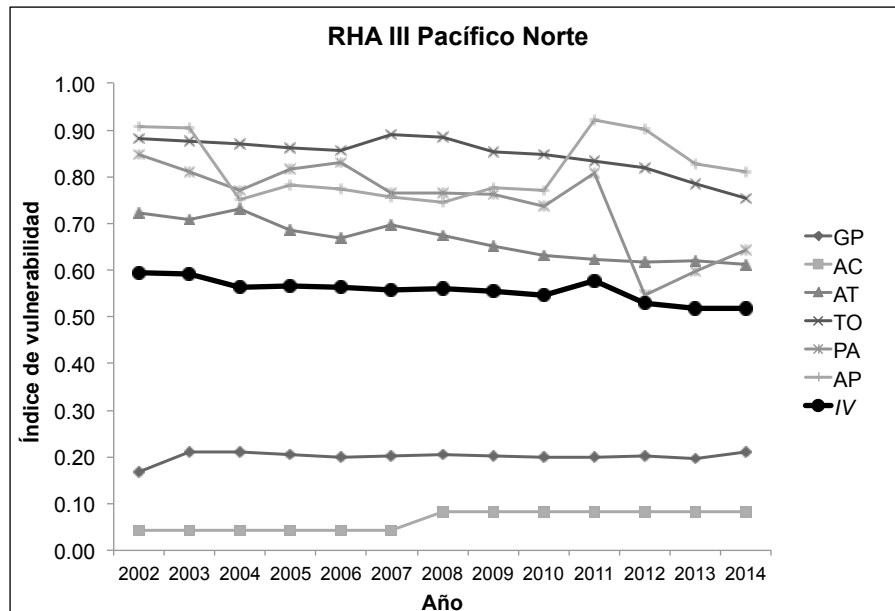


Figura 11. Índice de vulnerabilidad para la RHA III.

GP = grado de presión sobre el recurso agua; AC = acuíferos contaminados; AT = agua pública residual tratada con respecto del agua urbana consumida; TO = tarifa óptima de consumo de agua en ciudades; PA = productividad del agua en agricultura y AP = almacenamiento de agua en presas; línea negra = índice de vulnerabilidad promedio.

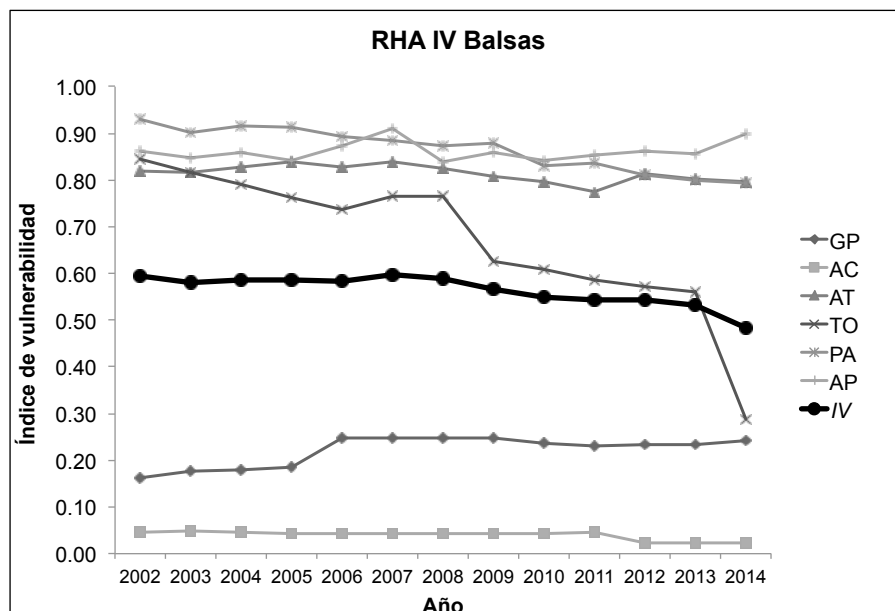


Figura 12. Índice de vulnerabilidad para la RHA IV.

GP = grado de presión sobre el recurso agua; AC = acuíferos contaminados; AT = agua pública residual tratada con respecto del agua urbana consumida; TO = tarifa óptima de consumo de agua en ciudades; PA = productividad del agua en agricultura y AP = almacenamiento de agua en presas; línea negra = índice de vulnerabilidad promedio.

El índice de vulnerabilidad ante sequías (valor promedio en línea negra) para la RHA V muestra que del 2002 al 2014 la vulnerabilidad se mantuvo constante en un nivel medio. El indicador de vulnerabilidad por tarifa óptima disminuyó considerablemente en la región por ajustes de tarifas, pasando a niveles de vulnerabilidad media. En contraste, los indicadores de productividad del agua en agricultura y almacenamiento en presas se traducen en niveles de vulnerabilidad alta. El indicador de agua tratada se mantuvo en niveles de vulnerabilidad media, mientras que los indicadores de grado de presión y acuíferos contaminados no presentaron cambios significativos, manteniéndose en niveles de vulnerabilidad muy bajos (Figura 13).

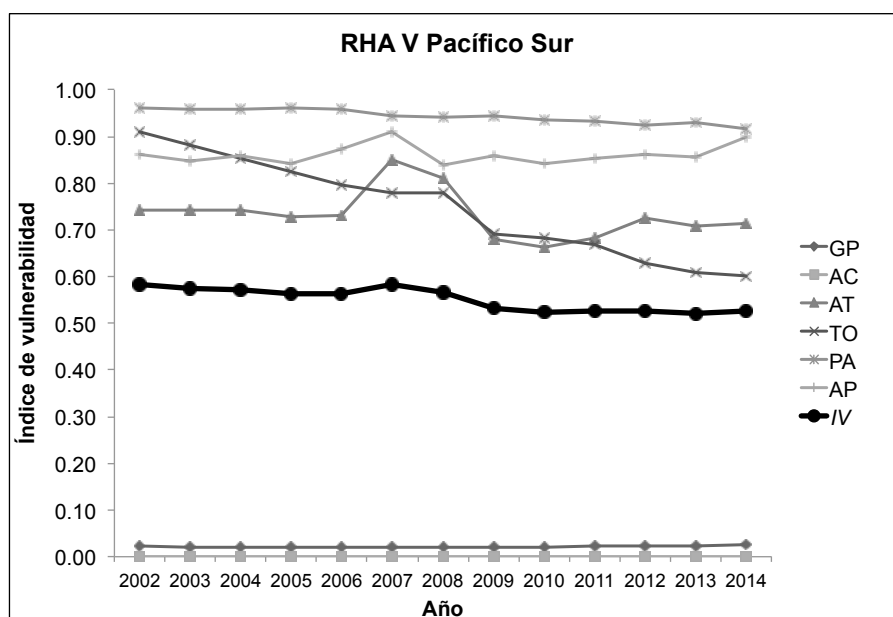


Figura 13. Índice de vulnerabilidad para la RHA V.

GP = grado de presión sobre el recurso agua; AC = acuíferos contaminados; AT = agua pública residual tratada con respecto del agua urbana consumida; TO = tarifa óptima de consumo de agua en ciudades; PA = productividad del agua en agricultura y AP = almacenamiento de agua en presas; línea negra = índice de vulnerabilidad promedio.

El índice de vulnerabilidad ante sequías meteorológicas (valor promedio en línea negra) para la RHA VI muestra que del 2002 al 2014 la vulnerabilidad se mantuvo constante en un nivel medio. El indicador de productividad del agua en agricultura y tarifa óptima disminuyeron, pero se mantuvieron en niveles de vulnerabilidad alta, mientras que el indicador de almacenamiento en presas presenta cambios variables, manteniéndose en niveles altos. En contraste, los indicadores de acuíferos contaminados, agua tratada y grado de presión aumentaron ligeramente (Figura 14).

El índice de vulnerabilidad ante sequías meteorológicas (valor promedio en línea negra) para la RHA VII muestra que del 2002 al 2014 la vulnerabilidad disminuyó ligeramente, esto es debido a que el indicador de agua tratada mejoró

considerablemente. Sin embargo, los indicadores de vulnerabilidad por almacenamiento en presas, productividad de agua en la agricultura y tarifa óptima se mantuvieron en niveles de vulnerabilidad alta. El indicador de acuíferos contaminados aumentó ligeramente, mientras que el indicador de grado de presión disminuyó, ubicándose en niveles de vulnerabilidad baja (Figura 15).

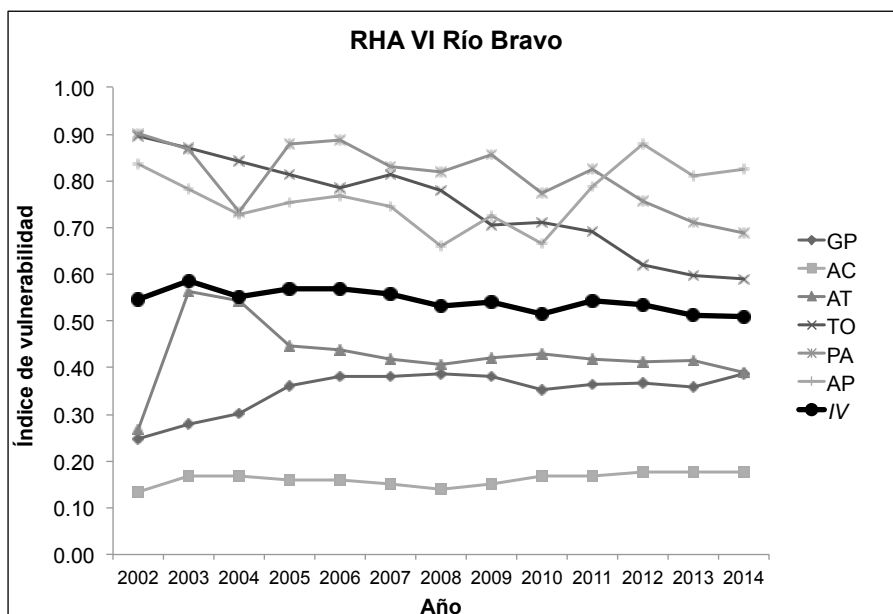


Figura 14. Índice de vulnerabilidad para la RHA VI.

GP = grado de presión sobre el recurso agua; AC = acuíferos contaminados; AT = agua pública residual tratada con respecto del agua urbana consumida; TO = tarifa óptima de consumo de agua en ciudades; PA = productividad del agua en agricultura y AP = almacenamiento de agua en presas; línea negra = índice de vulnerabilidad promedio.

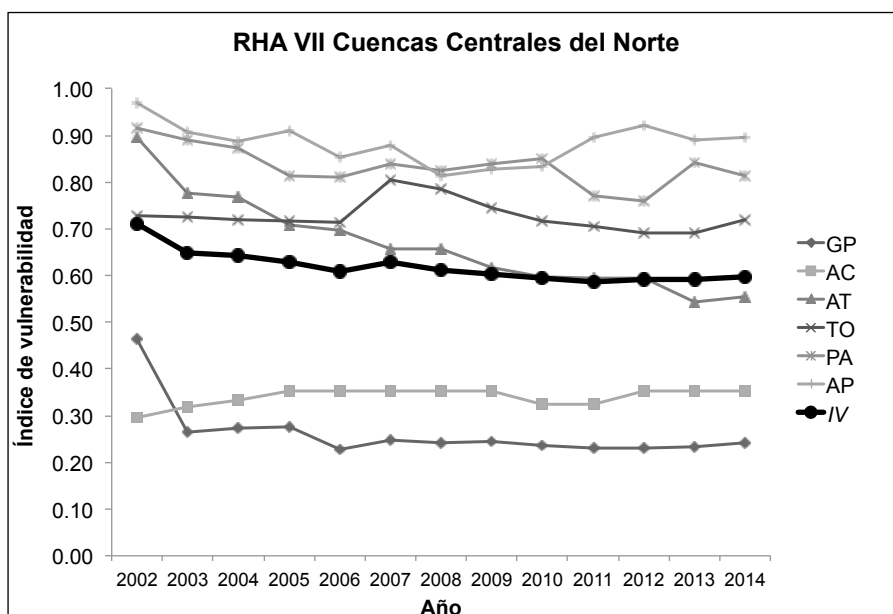


Figura 15. Índice de vulnerabilidad para la RHA VII.

GP = grado de presión sobre el recurso agua; AC = acuíferos contaminados; AT = agua pública residual tratada con respecto del agua urbana consumida; TO = tarifa óptima de consumo de agua en ciudades; PA = productividad del agua en agricultura y AP = almacenamiento de agua en presas; línea negra = índice de vulnerabilidad promedio.

El índice de vulnerabilidad ante sequías meteorológicas (valor promedio en línea negra) para la RHA VIII muestra que del 2002 al 2014 la vulnerabilidad disminuyó considerablemente, esto es debido esencialmente a que el indicador de tarifa óptima disminuyó, pasando del nivel de vulnerabilidad alta a baja. Los indicadores de agua tratada y productividad de agua en la agricultura pasaron del nivel de vulnerabilidad alta a media, mientras que el indicador de almacenamiento en presas se mantuvo en niveles altos, y los indicadores de acuíferos contaminados y grado de presión no presentaron cambios significativos (Figura 16).

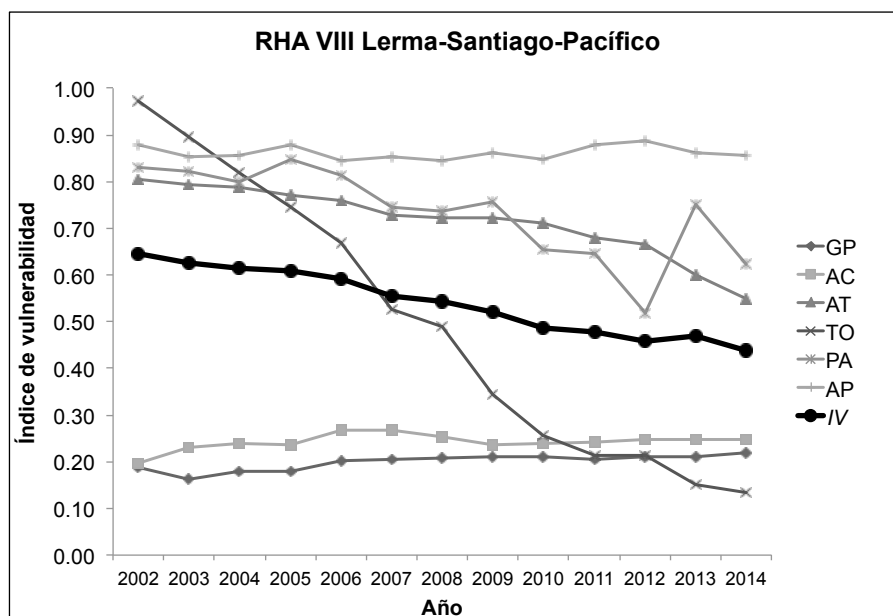


Figura 16. Índice de vulnerabilidad para la RHA VIII.

GP = grado de presión sobre el recurso agua; AC = acuíferos contaminados; AT = agua pública residual tratada con respecto del agua urbana consumida; TO = tarifa óptima de consumo de agua en ciudades; PA = productividad del agua en agricultura y AP = almacenamiento de agua en presas; línea negra = índice de vulnerabilidad promedio.

Para la RHA IX, el índice de vulnerabilidad ante sequías (valor promedio en línea negra) muestra que del 2002 al 2014 la vulnerabilidad se mantuvo en un nivel medio, esto debido a que el indicador de productividad de agua en la agricultura paso a un nivel de vulnerabilidad media, mientras que los indicadores de agua tratada, tarifa óptima y almacenamiento en presas se mantuvieron en un nivel de vulnerabilidad alta. En contraste, los indicadores de grado de presión y acuíferos contaminados se mantuvieron en un nivel de vulnerabilidad baja (Figura 17).

Para la RHA X, el índice de vulnerabilidad ante sequías (valor promedio en línea negra) muestra que del 2002 al 2014 la vulnerabilidad disminuyó ligeramente, esto es debido a que el indicador de tarifa óptima mejoró significativamente, pasando de un nivel de vulnerabilidad alta a media, mientras que los indicadores de agua tratada y

productividad de agua en la agricultura disminuyeron. El indicador de almacenamiento en presas se mantuvo en un nivel de vulnerabilidad media, mientras que los indicadores de grado de presión y acuíferos contaminados se mantuvieron en un nivel de vulnerabilidad baja (Figura 18).

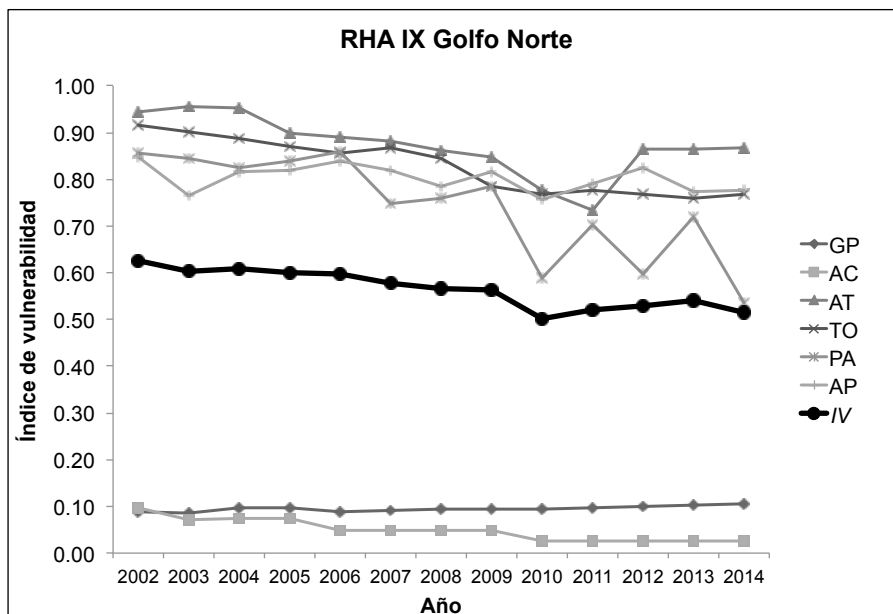


Figura 17. Índice de vulnerabilidad para la RHA IX.

GP = grado de presión sobre el recurso agua; AC = acuíferos contaminados; AT = agua pública residual tratada con respecto del agua urbana consumida; TO = tarifa óptima de consumo de agua en ciudades; PA = productividad del agua en agricultura y AP = almacenamiento de agua en presas; línea negra = índice de vulnerabilidad promedio.

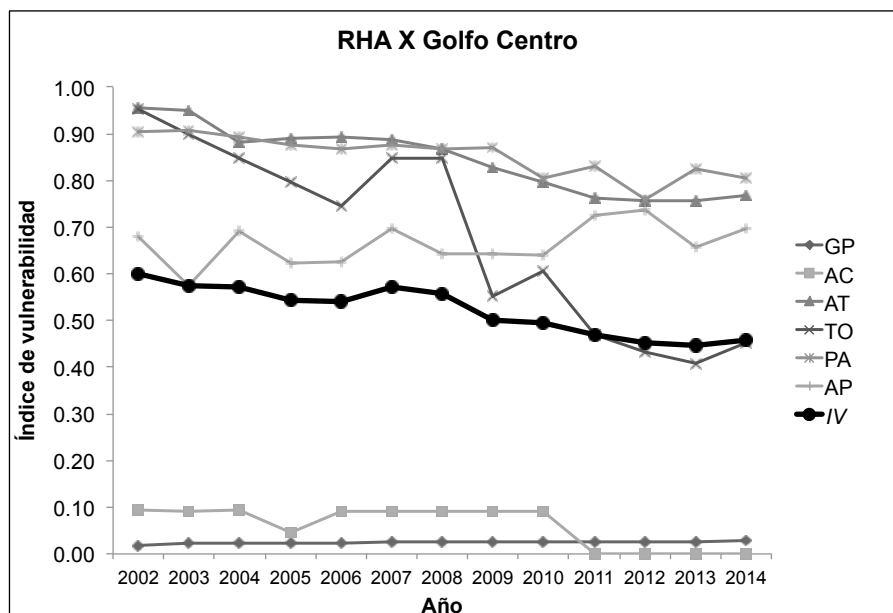


Figura 18. Índice de vulnerabilidad para la RHA X.

GP = grado de presión sobre el recurso agua; AC = acuíferos contaminados; AT = agua pública residual tratada con respecto del agua urbana consumida; TO = tarifa óptima de consumo de agua en ciudades; PA = productividad del agua en agricultura y AP = almacenamiento de agua en presas; línea negra = índice de vulnerabilidad promedio.

El índice de vulnerabilidad ante sequías meteorológicas (valor promedio en línea negra) para la RHA XI muestra que del 2002 al 2014 la vulnerabilidad se mantuvo constante en un nivel medio-bajo. El indicador de productividad del agua en agricultura mejoró considerablemente, pasando de un nivel de vulnerabilidad alta a media, mientras que los indicadores de agua tratada y tarifa óptima, aunque con cambios positivos, se mantuvieron en niveles de vulnerabilidad alta. Los indicadores de vulnerabilidad por efecto del almacenamiento en presas, de grado de presión y acuíferos contaminados no presentaron cambios significativos, manteniéndose estos dos últimos en un nivel de vulnerabilidad baja (Figura 19).

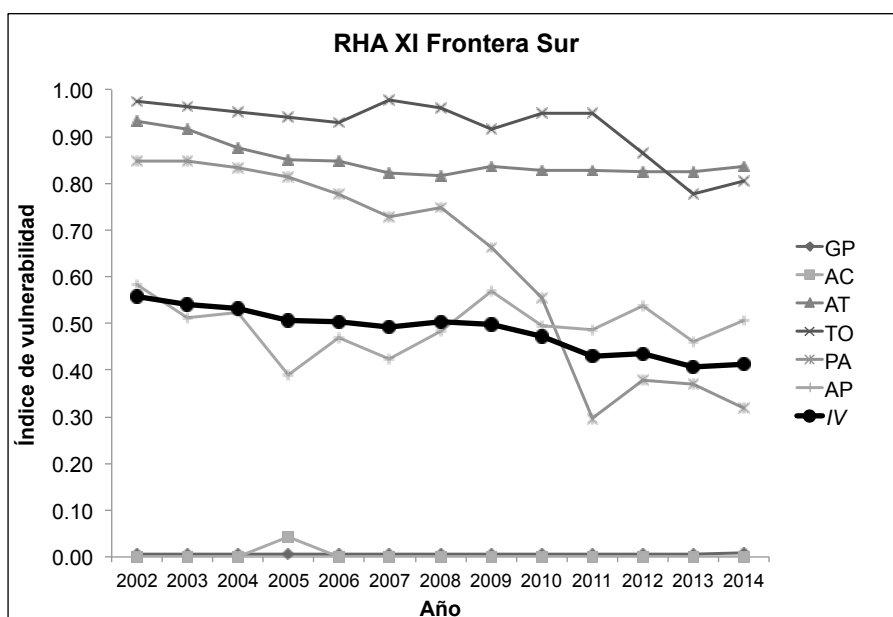


Figura 19. Índice de vulnerabilidad para la RHA XI.

GP = grado de presión sobre el recurso agua; AC = acuíferos contaminados; AT = agua pública residual tratada con respecto del agua urbana consumida; TO = tarifa óptima de consumo de agua en ciudades; PA = productividad del agua en agricultura y AP = almacenamiento de agua en presas; línea negra = índice de vulnerabilidad promedio.

El índice de vulnerabilidad ante sequías meteorológicas (valor promedio en línea negra) para la RHA XII muestra que del 2002 al 2014 la vulnerabilidad se mantuvo en un nivel medio-bajo. El indicador de tarifa óptima mejoró significativamente pasado de niveles altos a bajos. En un nivel de vulnerabilidad baja, se encuentran los indicadores de grado de presión que no presenta cambios significativos y el indicador de acuíferos contaminados. Por otra parte, los indicadores de agua tratada y productividad del agua en agricultura disminuyeron, pasando este último de un nivel de alta vulnerabilidad alta a media (Figura 20).

Finalmente, para la RHA XIII el índice de vulnerabilidad ante sequías meteorológicas (valor promedio en línea negra) muestra que del 2002 al 2014 la vulnerabilidad

disminuyó considerablemente. Sin embargo, aún se mantiene en un nivel de vulnerabilidad media-alta. El indicador de tarifa óptima mejoró, pasando de un nivel de vulnerabilidad alta a media-baja, mientras que los indicadores de agua tratada, grado de presión y productividad agua en la agricultura no presentaron cambios significativos y se mantuvieron en niveles altos, el indicador de acuíferos contaminados se mantuvo en un nivel de vulnerabilidad baja (Figura 21).

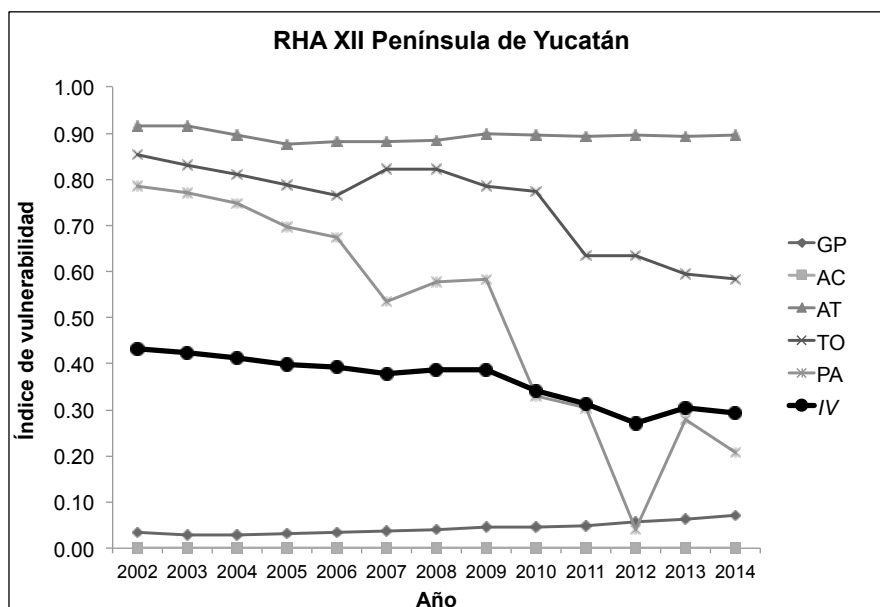


Figura 20. Índice de vulnerabilidad para la RHA XII.

GP = grado de presión sobre el recurso agua; AC = acuíferos contaminados; AT = agua pública residual tratada con respecto del agua urbana consumida; TO = tarifa óptima de consumo de agua en ciudades; PA = productividad del agua en agricultura y AP = almacenamiento de agua en presas; línea negra = índice de vulnerabilidad promedio.

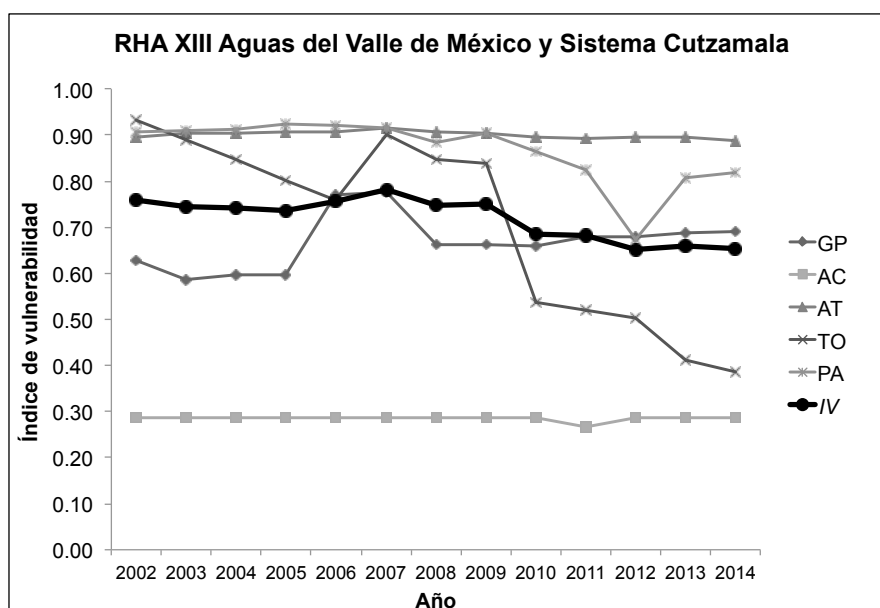


Figura 21. Índice de vulnerabilidad para la RHA XIII.

GP = grado de presión sobre el recurso agua; AC = acuíferos contaminados; AT = agua pública residual tratada con respecto del agua urbana consumida; TO = tarifa óptima de consumo de agua en ciudades; PA = productividad del agua en agricultura y AP = almacenamiento de agua en presas; línea negra = índice de vulnerabilidad promedio.

3.3.3 Etapa 3. Cuantificación del riesgo

Como se mencionó anteriormente, el peligro de que se presente una sequía meteorológica puede ser definido a partir de la estimación de la probabilidad de ocurrencia de una anomalía de precipitación representada en términos de percentiles o a través de un valor umbral asociado a los impactos. Considerando únicamente el aspecto meteorológico, se observó que un déficit de precipitación no necesariamente se traduce en sequías agrícolas o hidrológicas. Por ejemplo en algunas RHAs, como la RHA XIII, una ligera reducción de la precipitación se traduce en menos disponibilidad de agua para consumo humano, pero no necesariamente conduce a lo que se podría considerar una sequía agrícola. En otras palabras, la ocurrencia del desastre dependerá del nivel de riesgo, y no sólo del peligro o de la vulnerabilidad.

De esta forma, para caracterizar la magnitud crítica de una sequía meteorológica (valor umbral), es necesario estimar la cantidad de precipitación que daría lugar a la insuficiencia de agua disponible para las actividades socioeconómicas y los requisitos ambientales. Por ejemplo, en la RHA I la precipitación media anual es de 165 mm; esta cantidad de lluvia resulta en una disponibilidad promedio de agua de 4,625 hm³/año aproximadamente. El volumen de concesión en el 2010 se estimó en 3,733 hm³, una reducción de la lluvia alrededor de 19%, o más, reduciría la disponibilidad de agua a un nivel crítico. Así, se requiere que la precipitación anual acumulada sea de 133 mm o menos (considerado como valor umbral crítico) para que se presente una sequía hidrológica y/o agrícola.

La probabilidad de que esta condición se presente en un año en particular para la RHA I es de 36%. Sin embargo, esto es válido sólo para las RHAs del norte, ya que en la mayoría de las otras regiones, la disponibilidad de agua por lo general supera más del doble de los volúmenes de concesión. Por lo tanto, la probabilidad de una condición de sequía meteorológica que afecte significativamente estas regiones en a su disponibilidad de agua es mínimo (Tabla 6). En el caso de la RHA XIII se requieren considerar los aportes de agua de otras cuencas ya que el volumen concesionado supera el agua disponible de la región. Para comprender y explicar los diversos impactos a consecuencia de las sequías en las RHAs donde no hay presión del recurso hídrico, es necesario considerar aspectos como la distribución y los usos del recurso agua.

Tabla 6. Cantidad de precipitación que daría lugar a la insuficiencia de agua disponible para las actividades socioeconómicas y los requisitos ambientales. * Fuente: CONAGUA, 2015

RHA	PCP anual promedio (mm)*	Agua disponible promedio (hm ³)*	Volumen concesionado (hm ³)*	Reducción necesaria en pcp	Valor umbral de pcp	Probabilidad de ocurrencia
I	165	4625	3733	19%	133	36%
II	428	8203	6971	15%	364	24%
III	798	25351	10164	60%	320	0%
IV	941	24535	10385	58%	398	0%
V	1203	32732	1345	96%	49	0%
VI	366	12875	8771	32%	249	6%
VII	405	7563	4020	47%	215	0%
VIII	804	35592	13845	61%	313	0%
IX	839	24904	4575	82%	154	0%
X	1807	98833	4702	95%	86	0%
XI	1986	158018	2037	99%	26	0%
XII	1221	29262	2194	93%	92	0%
XIII	646	3555	4667	-	-	-

Considerando que el peligro (P_i) para el país corresponde a las sequías meteorológicas prolongadas (aquellas que pueden durar de 6 a 12 meses) (Méndez and Magaña, 2010), se decidió caracterizarlo por medio del SPI para un periodo de 12 meses. En la siguiente gráfica se muestran los valores de SPI-12 para las RHAs del norte. Se pueden observar dos periodos de sequía prolongados 2002 y 2011 (Fig. 22).

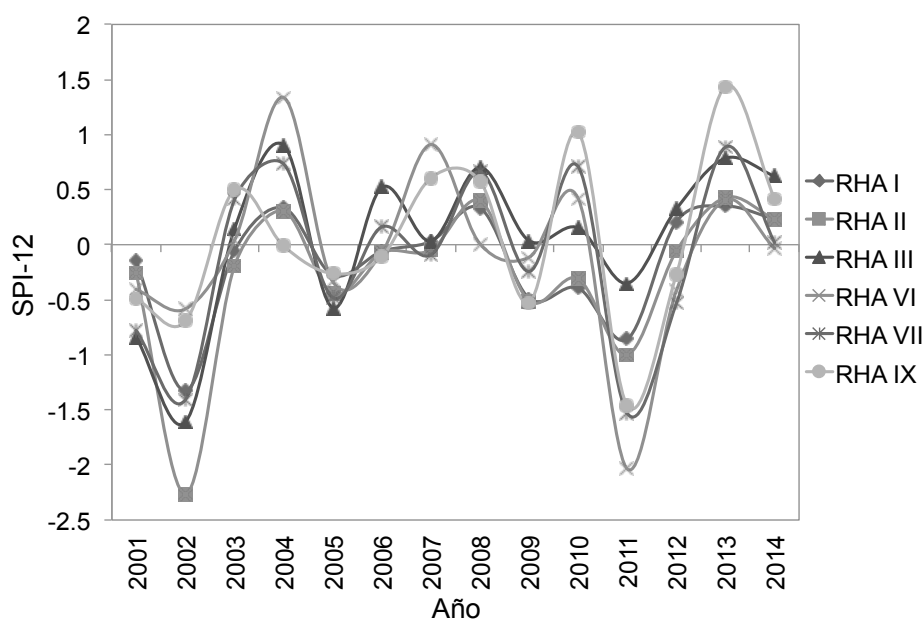


Figura 22. SPI-12 para las RHAs de norte para el periodo de 2001 al 2012. Fuente: IRI, 2016

Si bien, el SPI muestra la magnitud de la sequía meteorológica, la probabilidad de su ocurrencia es la misma para todas las regiones (McKee *et al.*, 1993; Keyantash and Dracup 2002), por ello, se definió el SPI con valor -1 como umbral. Los datos de SPI-12 se normalizaron para cada RHA (Tabla 7) considerando los valores negativos y transformándolos a un rango entre 0 y 1 (siendo 1 el valor más alto asociado con las condiciones de sequía intensas), a partir de:

$$P_i = \frac{3 - SPI_i}{6}$$

Tabla 7. Valores de SPI-12 normalizados para las RHAs en el periodo de 2002-2014. (Los sombreados gris en la celda indican episodios de sequía meteorológica). Fuente: IRI, 2015.

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	0.72	0.51	0.44	0.55	0.51	0.49	0.44	0.58	0.57	0.64	0.47	0.44	0.46
II	0.88	0.53	0.45	0.57	0.51	0.51	0.43	0.59	0.55	0.67	0.51	0.43	0.46
III	0.77	0.48	0.35	0.60	0.41	0.49	0.38	0.49	0.47	0.56	0.45	0.37	0.40
IV	0.76	0.50	0.52	0.53	0.49	0.47	0.44	0.54	0.33	0.57	0.45	0.30	0.48
V	0.72	0.47	0.51	0.47	0.35	0.45	0.37	0.54	0.26	0.43	0.44	0.32	0.43
VI	0.60	0.49	0.28	0.56	0.51	0.35	0.50	0.52	0.43	0.84	0.57	0.43	0.51
VII	0.73	0.43	0.38	0.58	0.47	0.52	0.39	0.54	0.38	0.76	0.59	0.35	0.50
VIII	0.76	0.47	0.38	0.61	0.47	0.51	0.42	0.56	0.37	0.60	0.56	0.30	0.50
IX	0.62	0.42	0.50	0.54	0.52	0.40	0.40	0.59	0.33	0.74	0.55	0.26	0.43
X	0.69	0.50	0.56	0.45	0.43	0.45	0.38	0.55	0.28	0.47	0.43	0.26	0.41
XI	0.63	0.50	0.58	0.38	0.41	0.46	0.42	0.65	0.35	0.40	0.52	0.32	0.40
XII	0.70	0.56	0.62	0.40	0.52	0.49	0.47	0.69	0.45	0.49	0.51	0.22	0.51
XIII	0.75	0.49	0.46	0.62	0.52	0.46	0.47	0.57	0.37	0.60	0.54	0.36	0.51

El siguiente paso metodológico para determinar el riesgo de sequía meteorológica es definir éste como el producto de la vulnerabilidad (VI) y el peligro (P_i). Los valores de riesgo ante sequía meteorológica (Tabla 8) están en el rango entre 0 y 1, donde 1 corresponde a un riesgo alto por sequía intensa y una alta vulnerabilidad. Los valores obtenidos del riesgo para las RHAs del norte del país son más altos y homogéneos en comparación con los valores obtenidos para las RHAs del centro-sur del país, con excepción de la RHA XIII (Figuras 23 y 24). Esta última región, en conjunto con las RHA II y RHA VII, presentan los valores de riesgo más altos ante sequías. Es el riesgo al final de cuentas el elemento que debe llevar a tomar modificaciones en el manejo de un sistema, pues éste puede ser muy vulnerable pero si el peligro es bajo, la probabilidad de desastre será baja también.

Tabla 8. Índice de riesgo por RHA para el periodo de 2002-2014

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	0.48	0.33	0.28	0.34	0.30	0.28	0.25	0.30	0.31	0.36	0.26	0.24	0.25
II	0.64	0.39	0.32	0.40	0.36	0.35	0.29	0.39	0.36	0.44	0.31	0.25	0.27
III	0.46	0.28	0.20	0.34	0.23	0.28	0.21	0.27	0.26	0.32	0.24	0.19	0.21
IV	0.45	0.29	0.30	0.31	0.29	0.28	0.26	0.30	0.18	0.31	0.25	0.16	0.23
V	0.42	0.27	0.29	0.26	0.20	0.26	0.21	0.29	0.14	0.22	0.23	0.17	0.23
VI	0.33	0.29	0.15	0.32	0.29	0.19	0.27	0.28	0.22	0.46	0.30	0.22	0.26
VII	0.52	0.28	0.24	0.37	0.29	0.32	0.24	0.33	0.23	0.44	0.35	0.21	0.30
VIII	0.49	0.29	0.23	0.37	0.28	0.28	0.23	0.29	0.18	0.29	0.26	0.14	0.22
IX	0.39	0.25	0.31	0.33	0.31	0.23	0.23	0.33	0.17	0.39	0.29	0.14	0.22
X	0.41	0.29	0.32	0.24	0.23	0.25	0.21	0.28	0.14	0.22	0.19	0.12	0.19
XI	0.35	0.27	0.31	0.19	0.21	0.23	0.21	0.32	0.17	0.17	0.22	0.13	0.16
XII	0.30	0.24	0.26	0.16	0.21	0.19	0.18	0.27	0.15	0.15	0.14	0.07	0.15
XIII	0.57	0.36	0.34	0.45	0.39	0.36	0.35	0.43	0.26	0.41	0.35	0.24	0.33

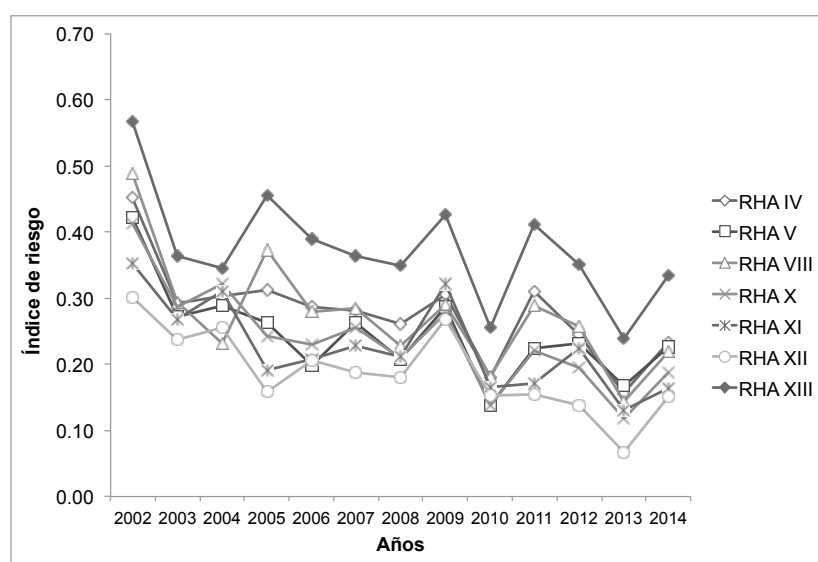


Figura 23. Índice de riesgo ante sequías para las RHAs del centro-sur.

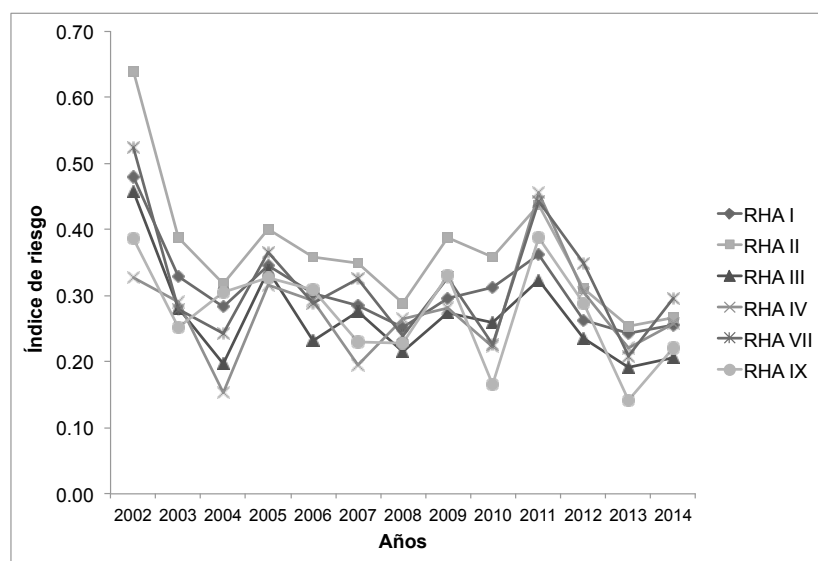


Figura 24. Índice de riesgo ante sequías para las RHAs del norte.

3.3.4 Etapa 4. Validación del modelo de riesgo ante sequías meteorológicas.

El índice de vulnerabilidad ante sequías meteorológicas, y por tanto de riesgo, pueden ser validados a través de los impactos en los sectores agrícola e hídrico comparando el comportamiento de los índices en años recientes de dichos elementos. El procedimiento puede seguir dos caminos:

- I) Comparando los niveles de riesgo entre regiones por ejemplo, bajo una sequía de magnitud similar para que sea la vulnerabilidad entre regiones la que determine la magnitud del impacto. De esta forma, ante la misma magnitud del peligro, regiones con diferentes vulnerabilidades pueden ser impactadas de manera diferencial. Si esto es coherente con los impactos, el índice de vulnerabilidad, y por tanto de riesgo, pueden considerarse adecuados.
- II) Examinando la dinámica temporal del riesgo y los impactos. Si una región experimenta sequías meteorológicas de magnitud similar en diferentes periodos de tiempo y bajo condiciones de vulnerabilidad diferenciadas, el índice de riesgo y los impactos debe reflejar este cambio.

La sequía agrícola es descrita a partir del porcentaje de superficie siniestrada de la productividad total (temporal y de riego). Debido a que los datos de SIACON se presentan a nivel estatal, se seleccionó un estado representativo por RHA (Tabla 9). Por su parte, los impactos de las sequías hidrológicas son descritos en términos de los niveles de almacenamiento de agua en las presas que se usan para riego. Al igual que con la sequía agrícola, se seleccionó una presa representativa por RHA (Tabla 10, ver más adelante).

Tabla 9. Coeficiente de correlación entre el riesgo y las área siniestradas para las RHAs

RHA	Estado representativo	Coeficiente de correlación
I	Baja California	19%
II	Sonora	-3%
III	Sinaloa	46%
IV	Michoacán	13%
V	Oaxaca	70%
VI	Chihuahua	24%
VII	Zacatecas	39%
VIII	Jalisco	25%
IX	Tamaulipas	17%
X	Veracruz	-19%
XI	Chiapas	-26%
XII	Yucatán	58%
XIII	Estado de México	23%

Los resultados demuestran que las variaciones de alta frecuencia de los riesgos están relacionados generalmente con la variabilidad climática interanual, mientras que la componente de baja frecuencia corresponde a la modulación por efecto de la vulnerabilidad. En otras palabras, la sequía hidrológica y/o agrícola se relaciona con la actividad de la amenaza, mientras que la magnitud del impacto se relaciona con el nivel de vulnerabilidad. Por ejemplo, las regiones del norte de México han experimentado numerosas sequías intensas. Sin embargo, las sequías hidrológicas o agrícolas son diferentes debido a sus vulnerabilidades. Tal es el caso de las sequías meteorológicas del 2002 y 2011 de magnitud similar, pero con impactos diferenciales debido a que la vulnerabilidad a la sequía ha cambiado entre estos períodos.

En el caso de la sequía agrícola, en 10 de 13 RHA los impactos son coherentes con los niveles de riesgo (correlación positiva) (Tabla 9). Utilizando el primer criterio de validación, al comparar el impacto de sequías de magnitud similar entre la RHA VI Río Bravo y la RHA VII Cuencas Centrales del Norte, el riesgo y el porcentaje de área siniestrada es mayor en la RHA VII que en la RHA VI, ya que el nivel de vulnerabilidad es menor en la RHA VI (Fig. 25 y 26). Esto se relaciona con la capacidad de almacenamiento y la productividad del agua en los distritos de riego de la RHA VI, los cuales presentan niveles bajos de vulnerabilidad. Se debe tener en cuenta que las pérdidas en el sector agrícola están también relacionadas con otros fenómenos meteorológicos (ej. vientos intensos y precipitación). Tal es el caso del 2004, donde las zonas afectadas están relacionadas con inundaciones de acuerdo con la base de datos DesInventar (Corporación OSSO, 2015).

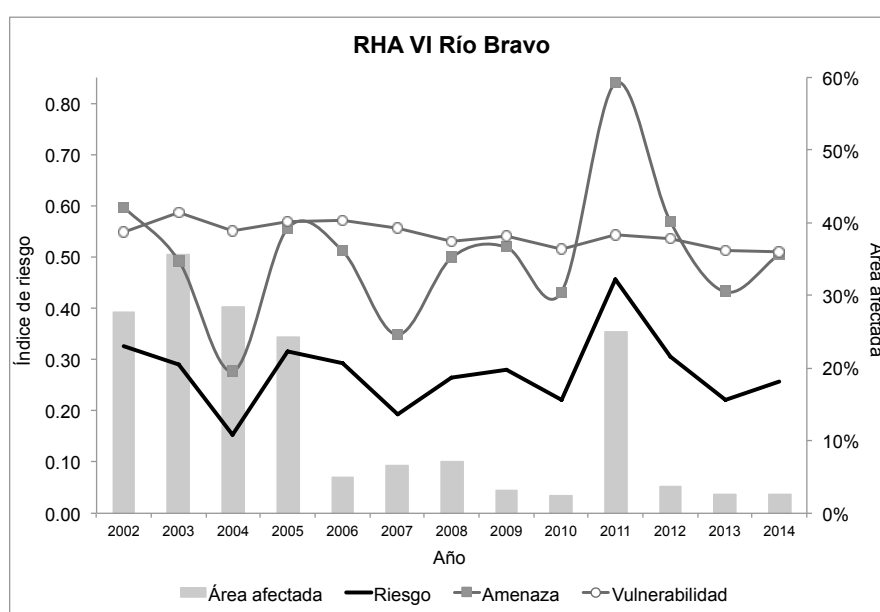


Figura 25. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en la RHA VI Río Bravo entre 2002 y 2014.

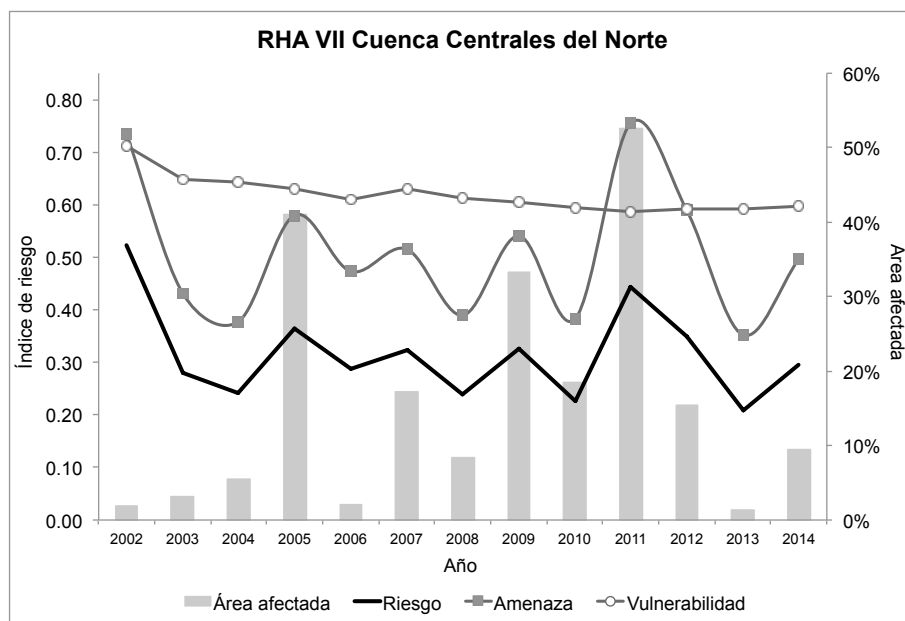


Figura 26. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en la RHA VII Cuenca Centrales del Norte entre 2002 y 2014.

Un segundo caso comparativo es entre las RHA IV Balsas y la RHA VIII Lerma Santiago Pacífico. En ambas, la tendencia de la vulnerabilidad es disminuir, lo cual es congruente con la disminución de impactos (Fig. 27 y 28). En el 2009, las pérdidas son similares, mientras que en el 2011, las afectaciones son mayores en la RHA VIII que presenta niveles altos vulnerabilidad relacionada con la capacidad de almacenamiento de aguas en presas y la productividad de agua en la agricultura.

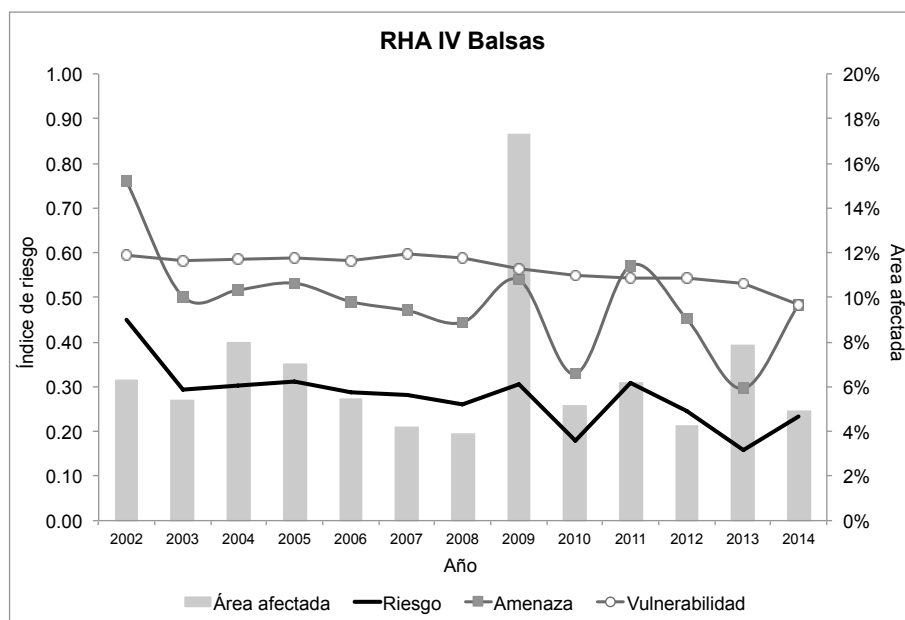


Figura 27. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en la RHA IV Balsas entre 2002 y 2014.

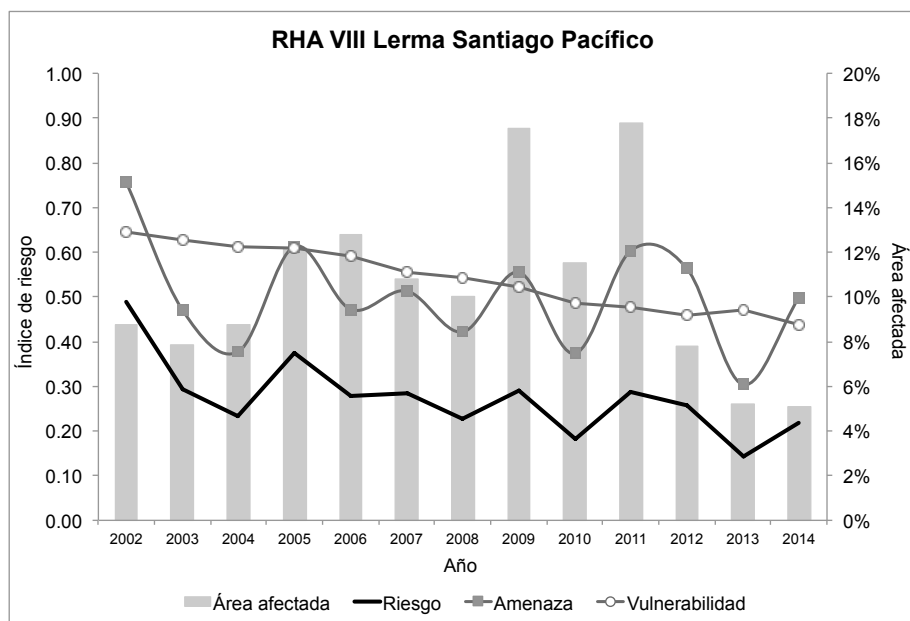


Figura 28. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en la RHA VIII Lerma Santiago Pacífico entre 2002 y 2014.

Un caso similar es entre las RHA V Pacífico Sur y la RHA X Golfo Sur, los niveles de vulnerabilidad en la RHA V son más altos que en la RHA X por lo que las afectaciones son mayores (Fig. 29 y 30).

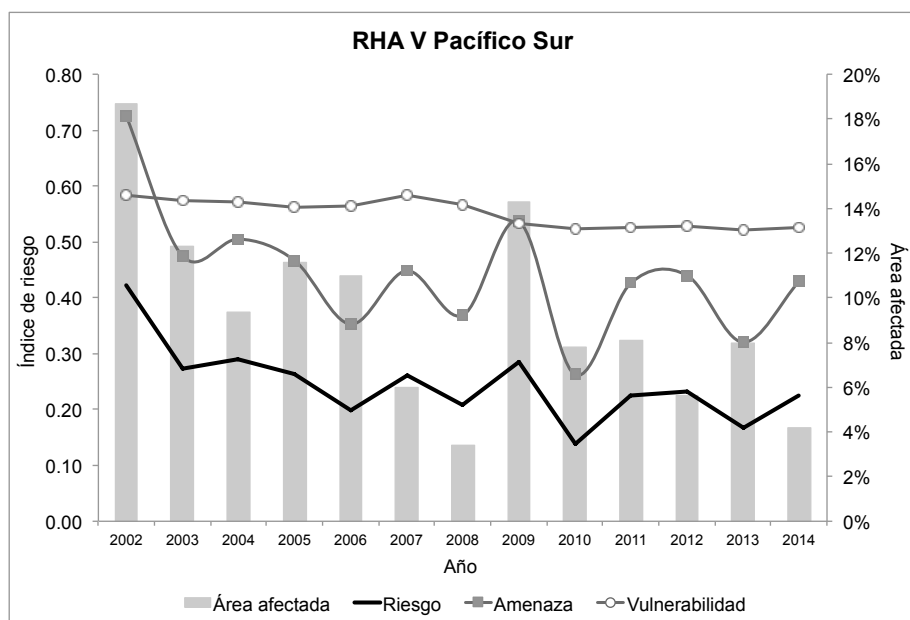


Figura 29. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en la RHA V Pacífico Sur entre 2002 y 2014.

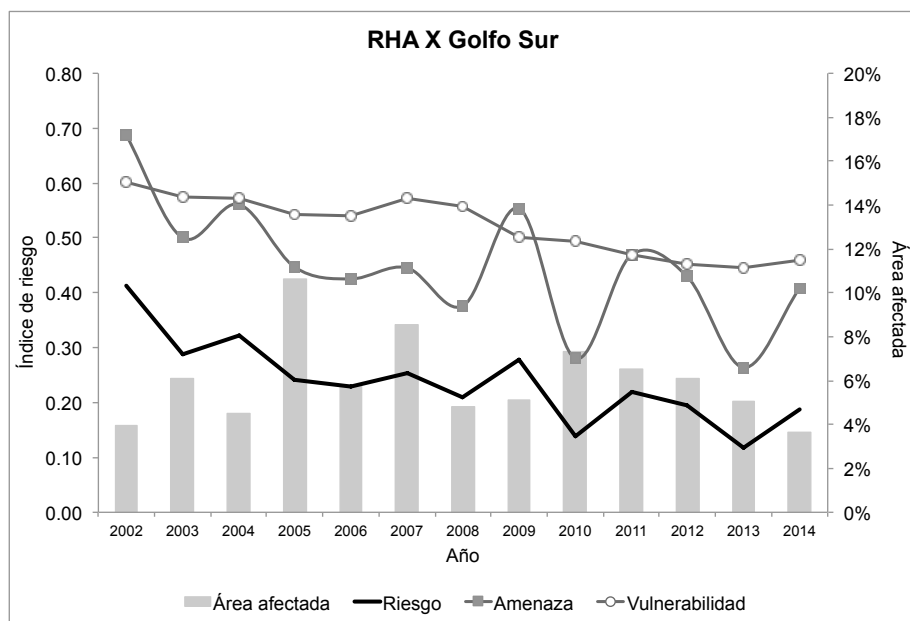


Figura 30. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en la RHA X Golfo Sur entre 2002 y 2014.

Bajo el segundo criterio de validación, en la RHA XII Península de Yucatán la tendencia negativa de los impactos es congruente con la disminución de vulnerabilidad. Los recursos hídricos en esta región han sido gestionados de manera eficiente, resultando en una mejoría del indicador de la productividad del agua en los distritos de riego, incluso en condiciones de sequía (año 2009) (Fig. 31). En el 2008, la sequía meteorológica tuvo impactos menores que la sequía de magnitud similar del 2002 debido a que el nivel de vulnerabilidad disminuyó.

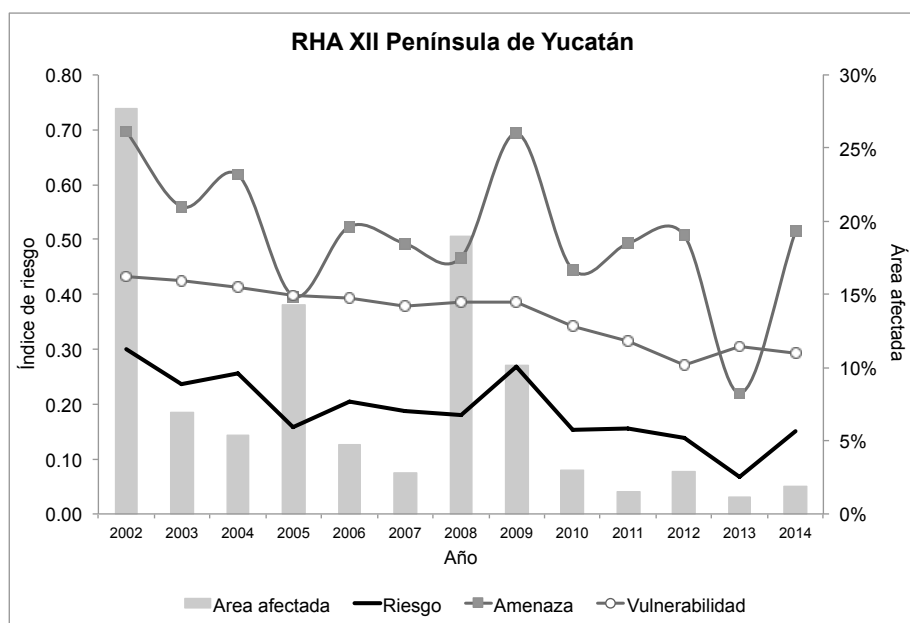


Figura 31. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en RHA XII Península de Yucatán entre 2002 y 2014.

En el caso de la RHA I Península de Baja California, las afectaciones presentan una tendencia a disminuir, con excepción del año 2014, lo cual coincide con la tendencia de la vulnerabilidad a disminuir relacionado con la ligera mejoría en la productividad del agua en los distritos de riego (Fig. 32). Mientras que en la RHA III Pacífico Norte, la tendencia de la vulnerabilidad coincide también con la disminución de impactos, esto es debido, por un lado, a la mejoría en la productividad del agua en los distritos de riego y por otro, a la recuperación en la capacidad de almacenamiento de las presas de la región (Fig. 33).

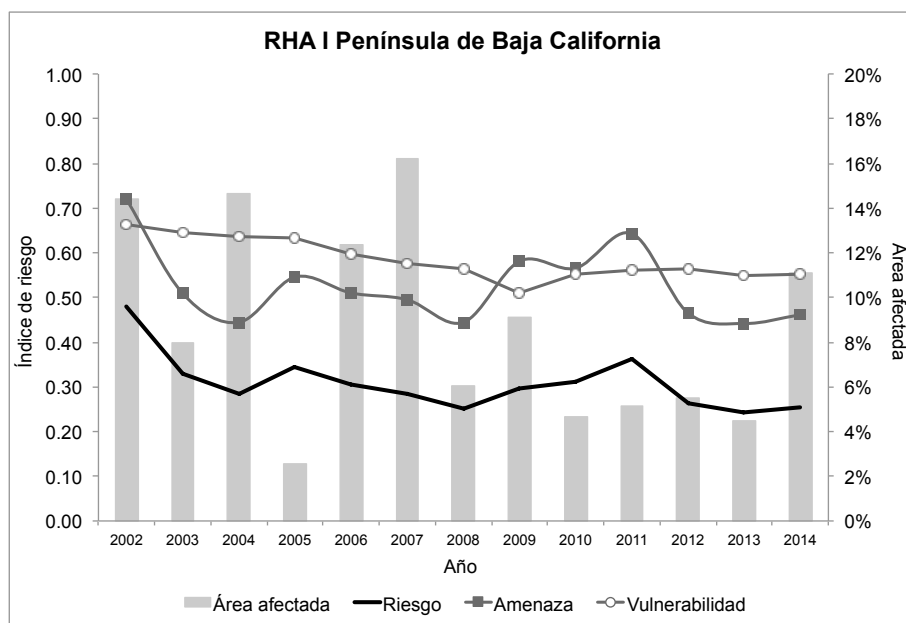


Figura 32. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en RHA I Península de baja California entre 2002 y 2014.

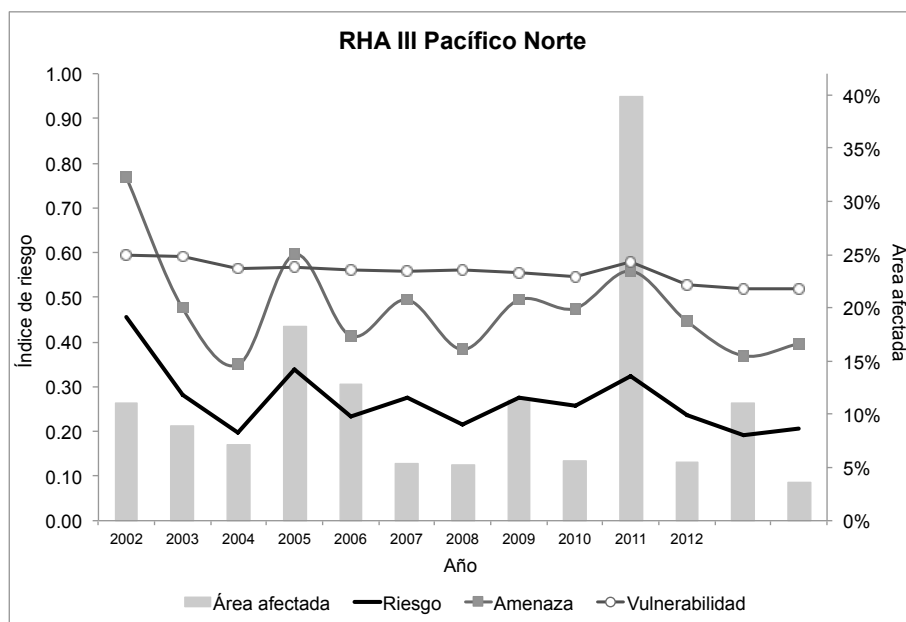


Figura 33. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en RHA III Pacífico Norte entre 2002 y 2014.

En las RHAs II Noroeste, IX Golfo Norte y XIII Valle de México y Sistema Cutzamala, si bien la vulnerabilidad se ha reducido, las afectaciones en la agricultura son variantes, éstas coinciden, en su mayoría, con el comportamiento de la amenaza (Figs. 34, 35 y 36).

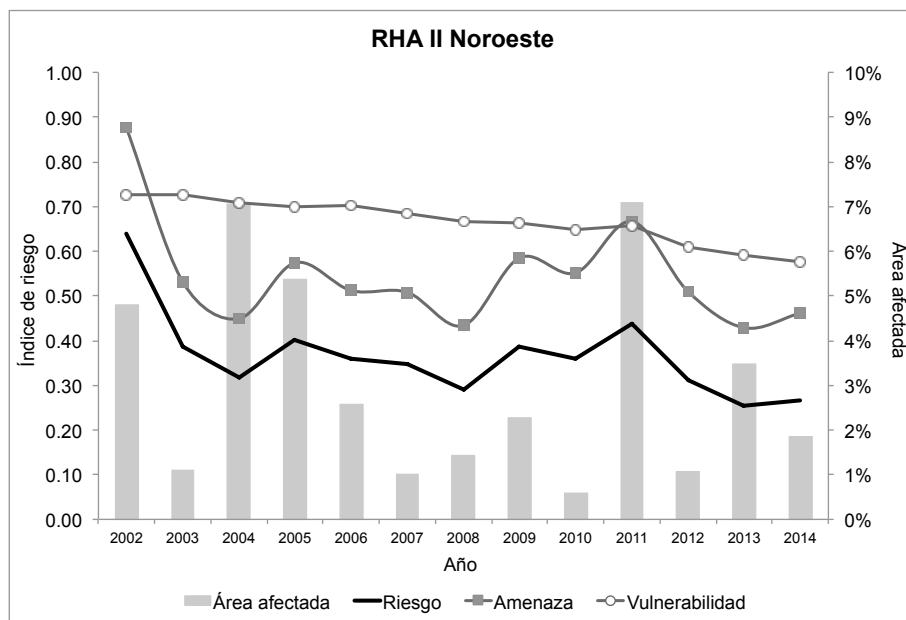


Figura 34. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en RHA II Noroeste entre 2002 y 2014.

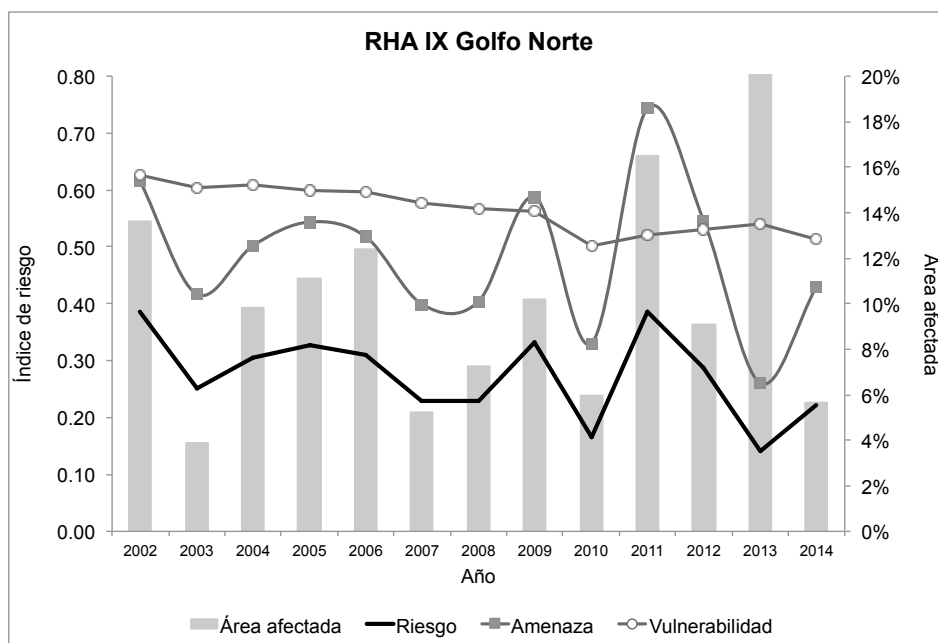


Figura 35. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en RHA IX Golfo Norte entre 2002 y 2014.

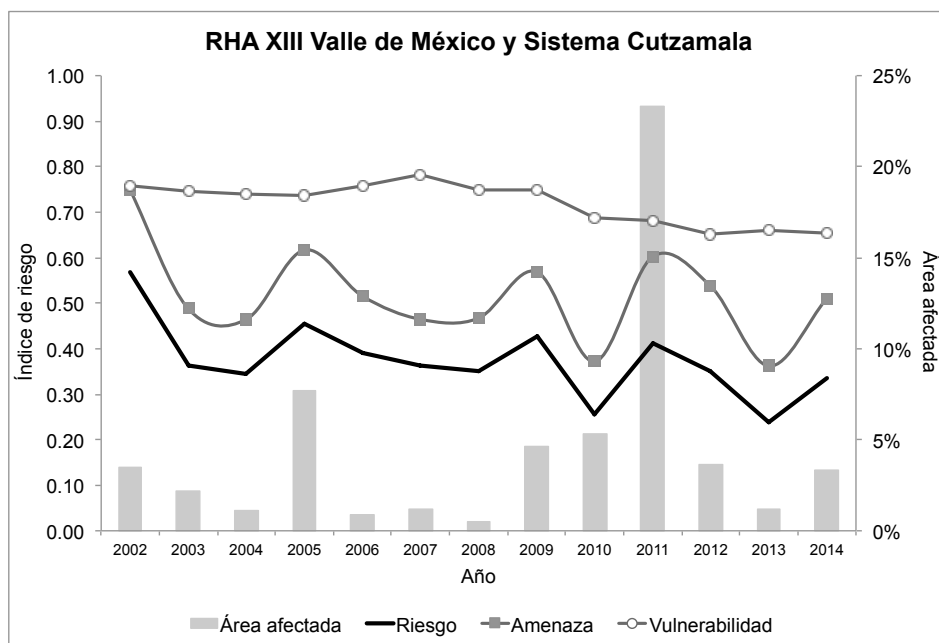


Figura 36. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en RHA XIII Valle de México y Sistema Cutzamala entre 2002 y 2014.

En la RHA XI Frontera Sur, la vulnerabilidad es opuesta a la tendencia a aumentar de las afectaciones en el sector agrícola. Si bien, se registró una mejoría en la productividad del agua en los distritos de riego, las afectaciones deben estar relacionadas con otro tipo de fenómeno (Fig. 37).

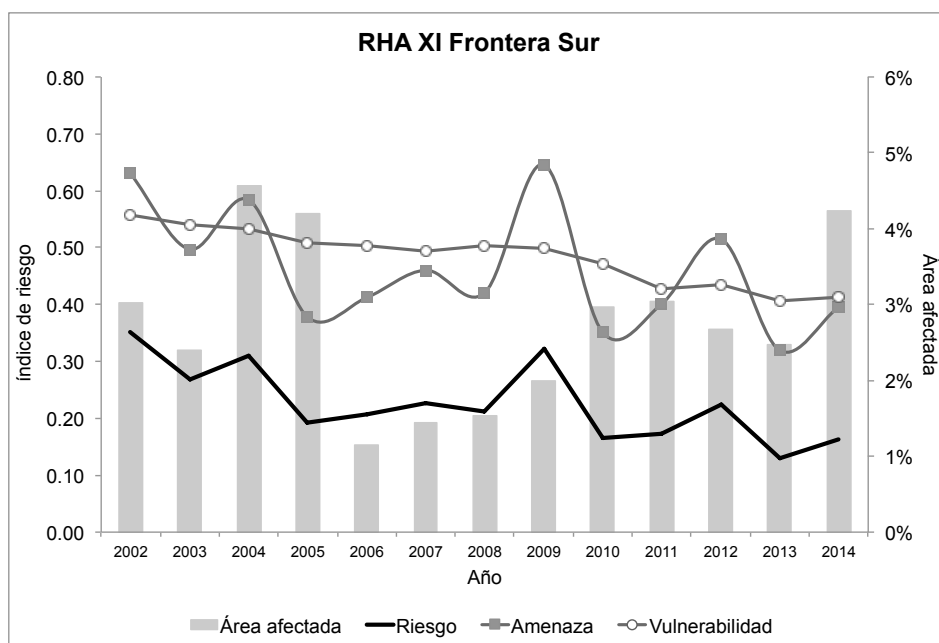


Figura 37. Índice de riesgo, vulnerabilidad, amenaza y el porcentaje de la superficie agrícola afectada en RHA XI Frontera Sur entre 2002 y 2014.

Para estimar el impacto de la sequía hidrológica se utilizó concretamente el registro de almacenamiento de agua en presas de riego en el mes de octubre, el cual corresponde a valores máximos de agua almacenada después de la temporada de lluvias en verano. Debido a la disponibilidad de datos, este análisis se pudo realizar solamente en seis RHAs, los resultados muestran que en cuatro de ellas, el riesgo modelado es coherente con los niveles de almacenamiento de las presas (correlación negativa) (Tabla 10).

Tabla 10. Coeficiente de correlación entre el riesgo y almacenamiento en presas en las RHAs

RHA	Nombre de la presa	Coeficiente de correlación
II	Álvaro Obregón	-7
III	Adolfo López Mateos	-85
IV	Vicente Guerrero	57
VI	La Boquilla	-54
VIII	Solís	10
IX	Vicente Guerrero	-89

Por ejemplo, en la RHA VI Río Bravo y la RHA IX Golfo Norte, la magnitud de la sequía fue alta en los años 2005, 2009 y 2011, esto dio lugar a niveles bajos en el almacenamiento de agua (Fig. 38 y 39). La sequía del 2010-2011 fue especialmente severa para todo el norte de México debido a su duración y severidad, en la RHA VI el riesgo era mayor que en la RHA IX ya que su vulnerabilidad es menor, en esta última región no se presentaron impactos serios durante los períodos de sequía recientes.

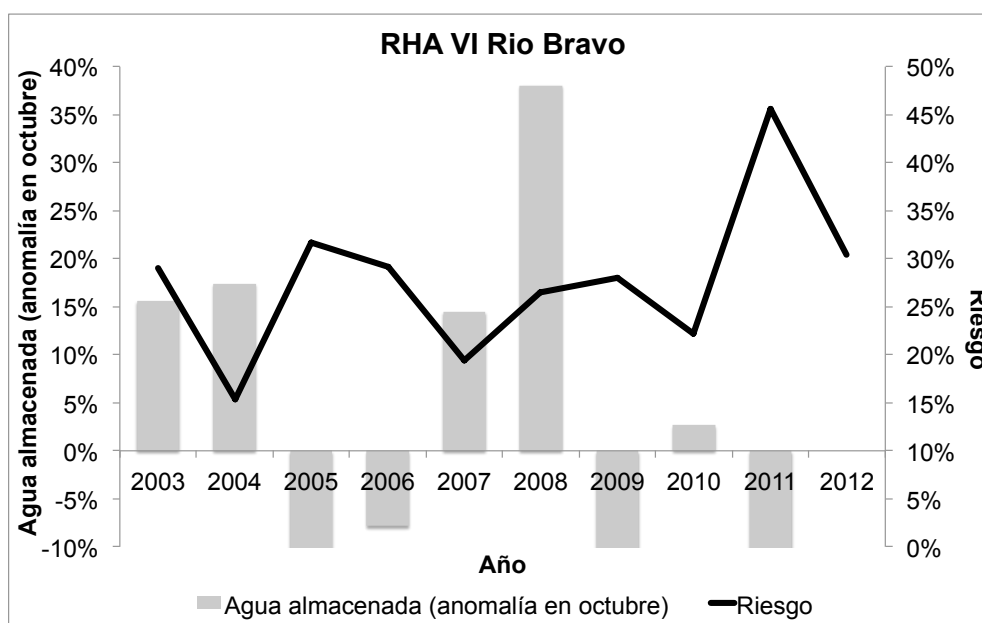


Figura 38. Índice de riesgo y almacenamiento de agua en la RHA VI Río Bravo entre 2002 y 2012.

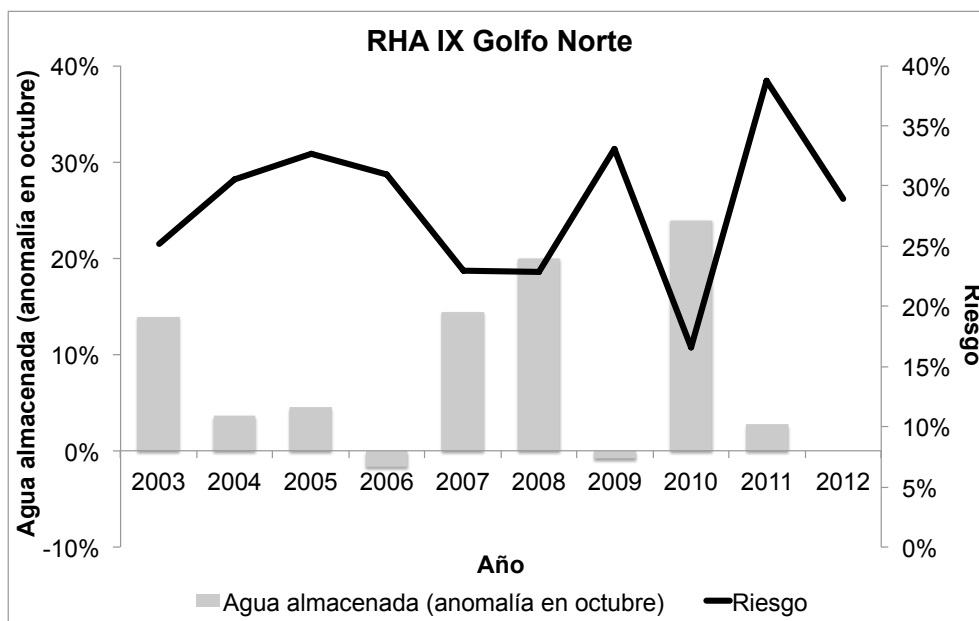


Figura 39. Índice de riesgo y almacenamiento de agua en la RHA IX Golfo Norte entre 2002 y 2012.

En contraste con las RHAs II Noroeste y VIII Lerma Santiago Pacífico, en los mismo años en que se presentaron sequías severas, los niveles de almacenamiento no bajaron sustancialmente. Sin embargo, en el 2010, los niveles se vieron gravemente afectados (Fig. 40 y 41). En ambas regiones, la magnitud de los impactos es congruente con los niveles de vulnerabilidad.

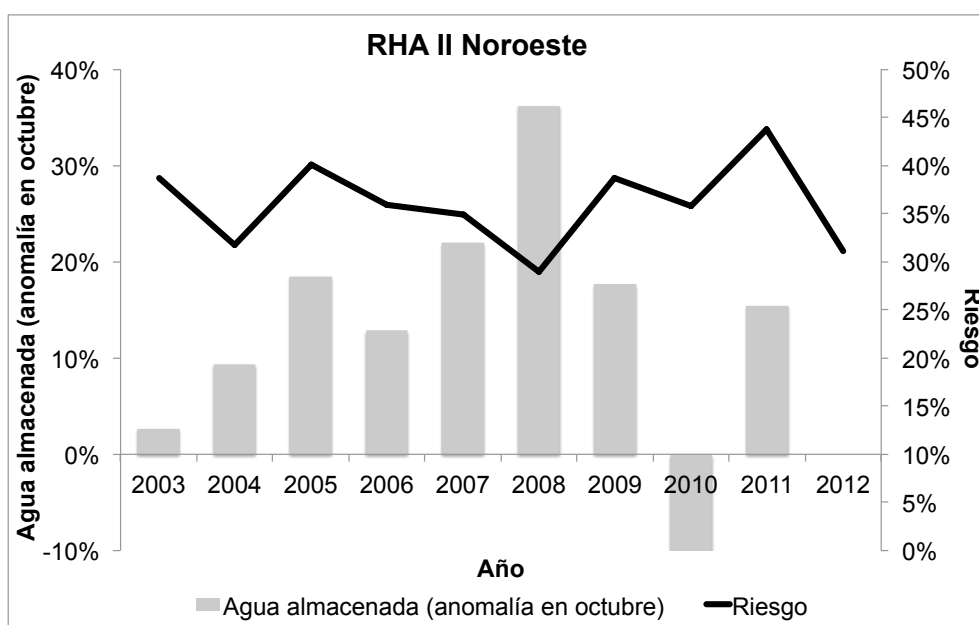


Figura 40. Índice de riesgo y almacenamiento de agua en la RHA II Noroeste entre 2002 y 2012.

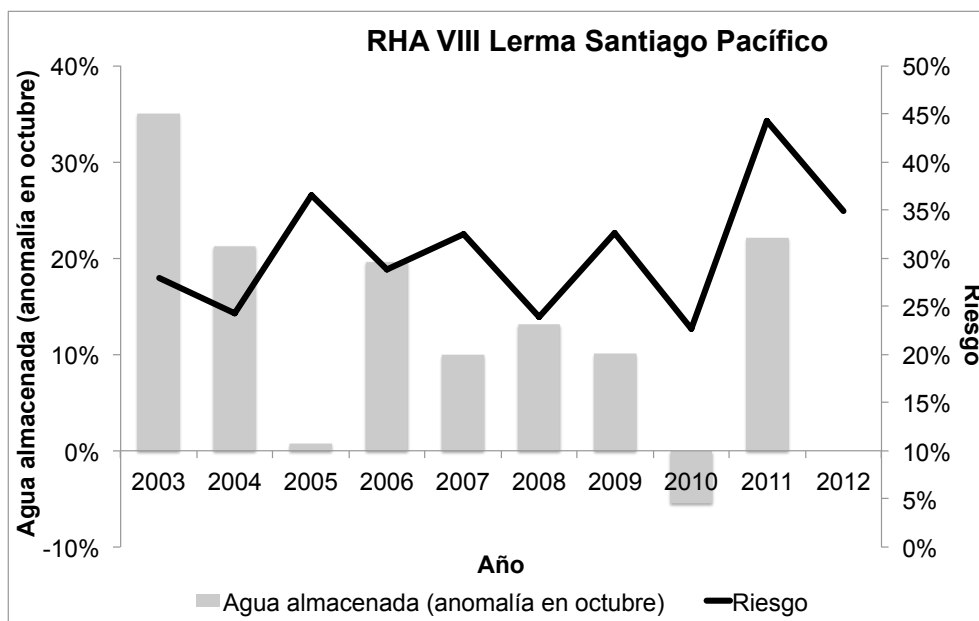


Figura 41. Índice de riesgo y almacenamiento de agua en la RHA VIII Lerma Santiago Pacífico entre 2002 y 2012.

La RHA III Pacífico Norte aunque tiene una alta disponibilidad de agua (baja vulnerabilidad), los niveles de almacenamiento se ven afectados ante la presencia de sequías intensas (2005 y 2011) (Fig. 42). Por otra parte, los niveles de almacenamiento en la RHA IV Balsas no presentan un señal congruente con los niveles de riesgo obtenido; no obstante, ésta es una las regiones con vulnerabilidad más alta relacionada con los bajos niveles de productividad de agua en los distritos de riego (Fig. 43).

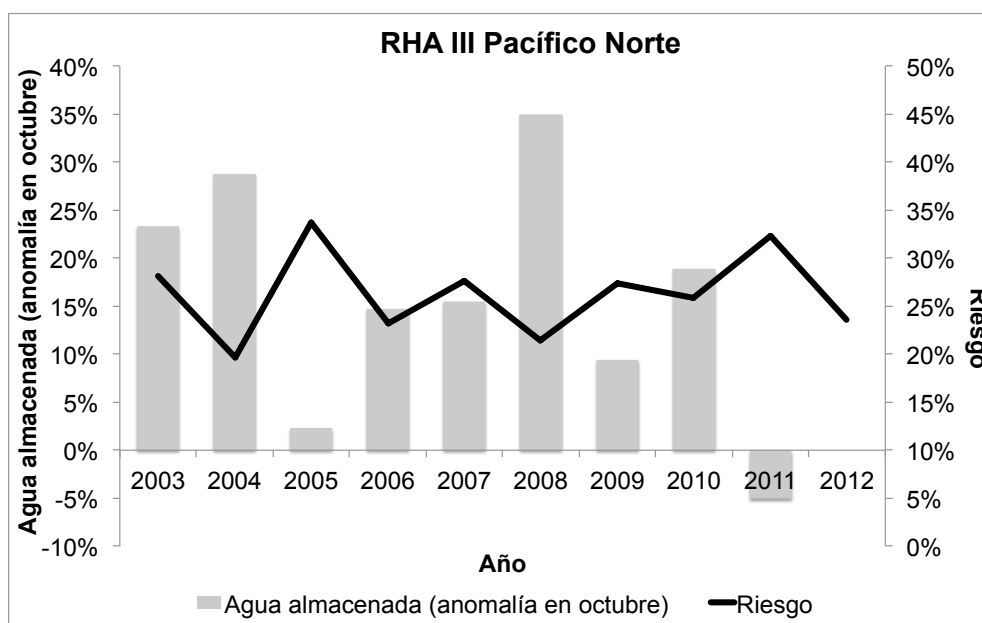


Figura 42. Índice de riesgo y almacenamiento de agua en la RHA III Pacífico Norte entre 2002 y 2012.

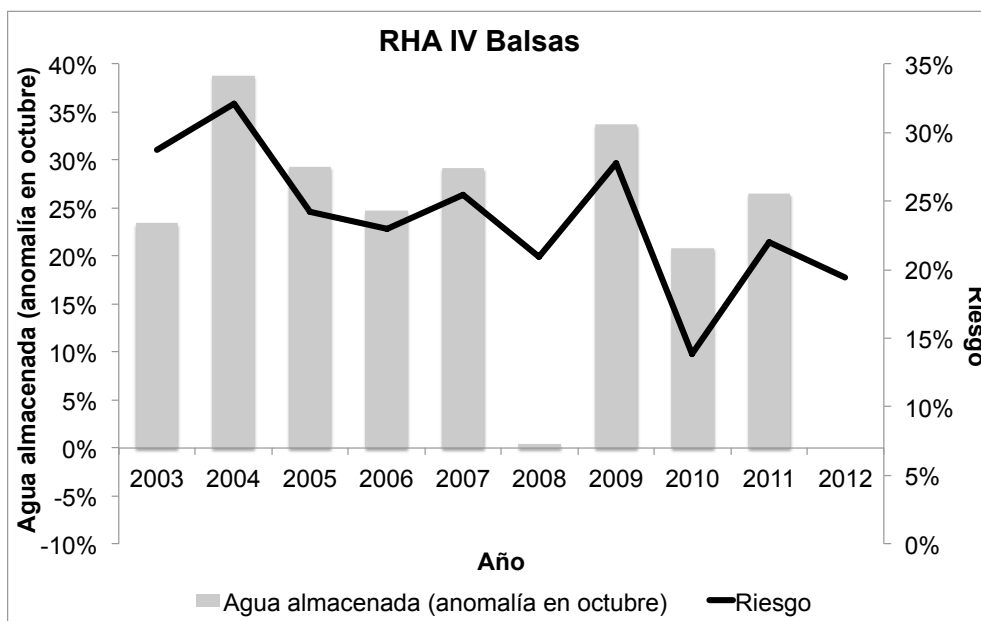


Figura 43. Índice de riesgo y almacenamiento de agua en la RHA X Golfo Centro entre 2002 y 2012.

En general, el índice de riesgo de sequía estimado a través de seis indicadores de vulnerabilidad, en conjunto con la ocurrencia de sequía meteorológica caracterizada con el SPI -12, muestran una correspondencia en más del 72% de las RHA de México con los impactos hidrológicos y agrícolas durante el período 2002-2014. Cabe señalar que existen algunas discrepancias que pueden ser explicadas por la insuficiencia de datos para evaluar la vulnerabilidad (ej. RHA VIII y RHA X), por la forma en que el índice de vulnerabilidad fue construido (uso de un promedio), y por la insuficiencia de los datos de impactos para evaluar el índice obtenido. Sin embargo, en cualquier evento, la vulnerabilidad actúa como un modulador de baja frecuencia de la magnitud del impacto.

La estimación del riesgo año con año permite hacer uso del pronóstico estacional de lluvia, o para un plazo de tiempo más largo, de los escenarios de cambio climático. Si la probabilidad de riesgo es alta será necesario implementar medidas, de magnitud tal que la vulnerabilidad disminuya y con ello, el riesgo.

Con base en la caracterización de la situación del recurso agua se reconoce que en la mayoría de las RHAs la evaluación de las demandas de agua por parte de los sectores socioeconómicos está llegando al límite de la oferta del recurso hidráulico, incluso se ha rebasado la disponibilidad natural en ciertas zonas, como lo muestra el estado de sobreexplotación de varios acuíferos.

Considerando la estimación de la vulnerabilidad a través del uso de indicadores se pueden sugerir acciones particulares para cada una RHA; sin embargo, se debe trabajar en diversos aspectos para disminuir la vulnerabilidad, como en el aumento de agua tratada que se distribuye en las ciudades y, a su vez, en aumentar la eficiencia y productividad de los usos del agua en el sector agrícola.

Ante los posibles impactos del cambio climático, si bien, los escenarios regionales de cambio climático son clave para definir a qué adaptarse, es importante identificar indicadores que permitan caracterizar la vulnerabilidad del sector en forma dinámica, para proyectarla al futuro cercano. De esta forma, con base en la información climática y una vez evaluado el riesgo, se puede priorizar la implementación y estimar los alcances de acciones como son:

- La implementación de sistemas de alerta temprana ante eventos hidrometeorológicos.
- Desarrollo de campañas de cuidado del agua y recarga artificial de los acuíferos para recuperar sus niveles y disponibilidad.
- Implementación de medidas de gestión del uso comunitario del agua, tanto en el abastecimiento como en el saneamiento.
- Desarrollo de planes de manejo de acuíferos y recarga inducida para recuperar acuíferos sobreexplotados.
- Desarrollo de planes de desarrollo urbano junto con reordenamiento territorial para que las zonas inundables estén libres de asentamientos humanos.

4. LA SEQUÍA COMO UN PROBLEMA DE GESTIÓN PARA LA PREVENCIÓN DEL RIESGO

Hasta antes del PRONACOSE, la gestión para la reducción del riesgo ante sequías en México no era un tema prioritario dentro de la agenda política del sector hídrico. A partir de este programa, el gobierno mandó un mensaje que indica que los costos de las acciones preventivas son siempre menores que los de la recuperación del desastre. Sin embargo, la sequía vista como un problema de gestión de riesgo, obliga a un cambio en la forma en que se entienden los desastres en gran parte del país, es decir desde el paradigma naturalista. Por otra parte, la prevención requiere saber por qué se es vulnerable a esta condición climática, así, cuando se habla de los impactos de la sequía meteorológica, el componente vulnerabilidad juega un papel esencial para comprender las sequías agrícola, hidrológica y social.

Así mismo, resulta necesario modificar el enfoque de los programas gubernamentales enfocados a la indemnización de daños, que si bien propician una recuperación rápida ante el desastre, a largo plazo no disminuyen la vulnerabilidad de los distintos sectores afectados por la sequía meteorológica. Se ha reconocido que el reaccionar a las sequías en "modo de crisis" puede aumentar la dependencia en los apoyos del gobierno o de otros donantes (Wilhite *et al.*, 2000).

Este es el caso de los estados de la región del norte de México, donde los impactos y las respuestas ante la ocurrencia de un déficit de precipitación se presentan de manera recurrente dejando en evidencia que se debe considerar los usos y distribución del agua antes y durante el periodo de sequía meteorológica (Curl *et al.*, 2015). Por ejemplo, en Sonora durante los años 1998, 1999 y 2000, considerados como años en crisis ante la falta de lluvia, los primeros impactos de la sequía se vieron reflejados en la salud de la vegetación y por tanto en el número de incendios forestales. Posteriormente, los niveles de las presas disminuyeron afectando la distribución del agua en los distritos de riego, las pérdidas en la producción agrícola se presentan de manera inmediata. Los efectos en la ganadería se resintieron por la falta de agua en los agostaderos y por la falta de alimento. Aunado a la falta de lluvia, se presentaron olas de calor que agravaron la situación de escasez en las zonas urbanas y en el campo, en algunos casos se produjeron epidemias. Una de las primeras acciones del gobierno fue, y sigue siendo, solicitar la declaratoria de emergencia por sequía, sin que la temporada de lluvias haya comenzado. Un aspecto importante, es que las lluvias invernales resultan ser significativas para la recarga de los mantos

acuíferos y las presas, lo cual puede disminuir o agravar los impactos de la falta de lluvias en verano (Neri y Briones, 2012) (Fig. 44).

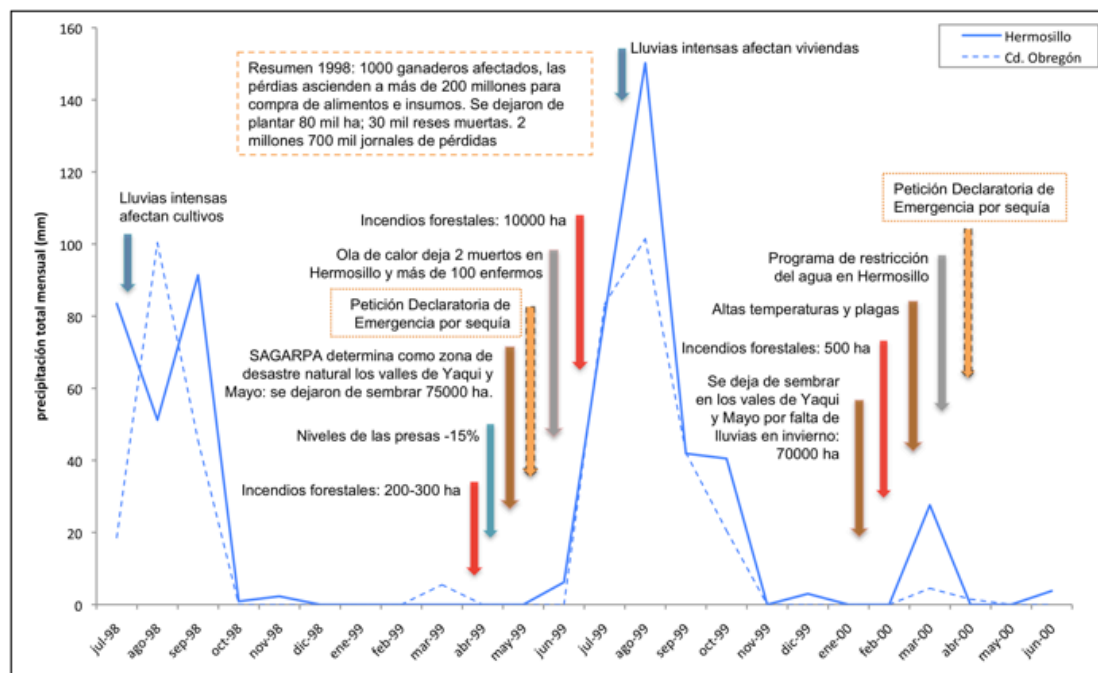


Figura 44. Ciclo de impactos ante sequía en Sonora 1998-2000. Línea continua precipitación total mensual en Hermosillo y línea punteada en Ciudad Obregón. Fuente: CONAGUA (2013) y Corporación OSSO (2015).

En los sectores identificados como altamente vulnerables a las sequías existen grandes oportunidades de que mediante políticas y estrategias, sea factible reducir substancialmente la vulnerabilidad. Es por tanto necesario, que las acciones dirigidas a la reducción de la vulnerabilidad ante sequía involucren mediante trabajo conjunto al sector gubernamental, productivo, sociedad civil, organismos no gubernamentales, medios de comunicación y la academia. Al respecto de esto, se cuenta con la propuesta de los elementos para el desarrollo de un plan de investigación científica enfocado en las sequías para México en el marco del PRONACOSE, que incluye, entre otros aspectos, comprender los procesos físicos y dinámicos de las sequías, así como mejorar las predicciones de las sequías meteorológicas (Magaña, 2016).

Por otra parte, en materia de prevención, el uso del Monitor de la Sequía resulta no ser la mejor herramienta para desencadenar acciones y comunicar alertas o significados a la población y a los sectores, esencialmente porque hace referencia únicamente a aspectos físicos del fenómeno. Si bien, contempla los posibles impactos de la falta de lluvia, según la categoría (D0 a D4), estos no necesariamente están contruidos en una valoración de niveles de riesgo para México, puesto que los impactos de las sequías son diferenciados y están relacionados con la vulnerabilidad

específica de los sectores o sistemas locales. Son muchas las variables que deben ser consideradas para distinguir cuánto es mucha o poca lluvia para el desarrollo de ciertas actividades. Es por ello, que aspectos como la demanda, la presión, la condición de los acuíferos, la capacidad de almacenamiento, los precios y la capacidad del pago del servicio, entre otros, deben ser considerados para ilustrar y estimar los posibles impactos de la sequía.

Además, el uso del Monitor limita la posibilidad de realizar acciones para reducir los impactos de la sequía meteorológica antes de que se presente. Pasar de datos climáticos a información útil para la toma de decisiones resulta complicado, en particular cuando se habla de sequías de larga duración, ya que los pronósticos climáticos no forman parte del proceso de toma de decisiones. Sin embargo, la prevención requiere usar diagnósticos y pronósticos climáticos en conjunto con un plan de reducción de vulnerabilidad ante las sequías meteorológicas. De esta manera, la planeación (preparación) basada en la gestión del riesgo puede disminuir la magnitud de los impactos de las sequías agrícola, hidrológica y social.

Aunque la sequía es un fenómeno difícil de pronosticar, esta no es una limitante ya que el conocimiento que se tiene de las sequías permite implementar acciones preventivas a corto y largo plazo (Steinemann, 2006; Lyon *et al.*, 2012; Quan *et al.*, 2012; Pozzi *et al.*, 2013; Dutra *et al.*, 2014). En el caso de México, la posibilidad de diagnosticar e incluso pronosticar el inicio, duración y fin de la sequía ha sido estudiada por Méndez y Magaña (2010), quienes construyeron relaciones entre los déficit prolongados y significativos de lluvia que definen una sequía meteorológica y condiciones de variabilidad climática de gran escala (anomalías de temperatura de superficie del mar, condiciones de vientos y flujos de humedad). De esta manera también, Magaña (1999) y Magaña *et al.* (2003) explicaron las condiciones de sequía que se producen con frecuencia en verano bajo condiciones El Niño sobre el centro sur de México, o las condiciones de sequía en el norte de México bajo condiciones La Niña. En un esfuerzo por explicar las sequías prolongadas, consideradas las más perjudiciales en la agricultura, la ganadería y la hidrología, Méndez y Magaña (2010) desarrollaron diagnósticos de la dinámica interdecadal de la sequía. En ambos casos, se encuentra que el forzante de la precipitación sobre México está asociado con las anomalías de la Temperatura de Superficie del Mar (TSM) y su variabilidad, pero dejan abierta la posibilidad de procesos relacionados con los cambios de uso de suelo que puedan estar llevando a tendencias de largo plazo hacia la disminución de la lluvia en ciertas regiones.

Así mismo, Franco (2012) analizó la habilidad de los modelos climáticos para pronosticar la precipitación y la temperatura del IRI (1979-2010), los resultados indican que bajo condiciones El Niño o La Niña (forzante intenso), se pronostica mejor que ante condiciones de señales débiles como las anomalías de la TSM. En correspondencia con la señal de El Niño, las predicciones de invierno tienden a ser mejores en el norte de México que las de verano. Además, se reconoce que existen limitaciones en el pronóstico del clima relacionadas en gran medida por la llamada “barrera de predecibilidad”, esto es, si se pronostica con condiciones iniciales previas a marzo o abril, la predecibilidad del clima decae después de la primavera. Esto constituye un reto para la predicción de largo plazo de las lluvias de verano en México. En particular, el noroeste de México posee baja predecibilidad de las lluvias de verano asociadas con el monzón (Magaña, 1999). Los resultados anteriores se deben traducir en niveles de confianza, que deben ser considerados al introducir el pronóstico en los SIATS.

Un ejemplo del potencial de la información climática para acciones preventivas es el caso de la región que abarca los CC de la Costa de Guerrero y de la Costa de Oaxaca, que tienen una predecibilidad del clima alta, debido a la relación significativa que existe entre la presencia de El Niño con las lluvias (Magaña, 1999). Con pronósticos estacionales de la lluvia con mayores posibilidades de acierto, se puede trabajar con mayor confianza en acciones coyunturales ante la espera de la sequía meteorológica. Cuando esta información se presenta en términos de riesgo, puede ser de gran utilidad para la planificación de los ciclos agrícolas, ya que los agricultores pueden variar la estrategia de trabajo, utilizando variedades que requieren de mucha agua o variedades resistentes a la sequía (Neri, 2010). Incluso, pueden llevar a la contratación de seguros colectivos para proteger a los productores y compensar económicamente posibles pérdidas. El conocimiento del clima significa, por tanto, una oportunidad para reducir pérdidas o para aumentar rendimientos, siempre y cuando se cuente con estrategias de planeación del riesgo y de respuesta.

En zonas, donde la predecibilidad de la sequía meteorológica es menor, es necesario trabajar en medidas coyunturales, a pesar de no saber con precisión cuándo puede presentarse una sequía severa y/o prolongada, se debe trabajar en mantener una condición de riesgo baja. Tal es el caso de la mayor parte de los estados del norte de México, por ejemplo en el noroeste, donde es difícil prever la ocurrencia de un monzón con anomalías positivas o negativas de lluvia. Así, en Sonora por ejemplo, la baja predecibilidad estacional del clima debiera llevar a mejorar de forma significativa el uso

y aprovechamiento de los recursos hídricos, sin esperar a contar con esquemas de pronósticos estacionales de lluvia para el manejo del agua año tras año.

Si bien, en los últimos años, la gestión del riesgo ha adquirido mucha atención en la academia, los tomadores de decisión y la sociedad en general, existen pocos ejemplos que demuestren lo que conlleva gestionar un riesgo, es decir, desarrollar un esquema que permita prevenir las pérdidas asociadas a la probabilidad de ocurrencia de un evento a través de la disminución de la vulnerabilidad.

A través de los SIATS se puede transitar de la respuesta al desastre a la prevención de los impactos en el corto y largo plazo. El objetivo primordial de un SIATS es generar información climática sobre la sequía y sus impactos que permitan diseñar estrategias de reducción de vulnerabilidad ante dicho fenómeno y que lleven a la toma de decisiones oportunas (Neri, 2010). Una parte esencial en el SIATS es la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo; la propuesta desarrollada en este trabajo contribuye en este aspecto, es así como el modelo de riesgo obtenido puede ser utilizado en combinación con el pronóstico climático estacional para desarrollar los escenarios de riesgo y estimar los posibles impactos de una sequía en un futuro próximo. Si la vulnerabilidad se proyecta, ya sea mediante el uso de su tendencia o considerando cambios en los factores de vulnerabilidad para las próximas décadas, se puede tener una mejor idea de los posibles impactos en diversos escenarios de cambio climático (este aspecto no fue desarrollado en el presente trabajo).

Es recomendable que las alertas sean emitidas considerando el proceso de toma de decisiones por sector. Por ejemplo, en el caso de la agricultura se deben regir por los periodos de siembra y cosecha, tanto en verano como en invierno. En el caso del sector hídrico se requiere conocer si el inicio y duración de la temporada de lluvias se verá afectado por un periodo de sequía. En el caso del sector forestal, para prevenir los incendios se necesita conocer si habrá un periodo largo sin lluvias diarias (una o dos semanas) durante los primeros meses del año, así como la presencia de altas temperaturas. Este proceso debe ser establecido con base en la evaluación de los impactos y el análisis del riesgo por sector, considerando el monitoreo y pronóstico de la sequía.

La implementación de los SIATS requiere que la información en materia de agua esté disponible en tiempo real, que existan los medios de comunicación necesarios para que la información llegue a las instancias y a las personas adecuadas, así como de la

capacidad y del conocimiento para usar dicha información entre los actores sociales. Por otro lado, armonizar estas acciones con políticas públicas y sus instrumentos (por ejemplo subsidios, programas como FOPREDEN-FONDEN, o más sectoriales asociados al agro) supone romper con viejas inercias culturales e institucionales, que tienen beneficios económicos asociados a las indemnizaciones por desastre como parte de sus *modus operandi*.

Es de suma importancia que los tomadores de decisión comprendan el riesgo ante sequía con los costos socioeconómicos que ésta puede tener, respeten el servicio de alerta y sepan cómo reaccionar; es por ello que se debe preparar y generar capacidades en los ámbitos nacional y regional. Asimismo, es indispensable que existan planes de gestión de riesgo ante sequía que hayan sido objeto de prácticas y sometidos a prueba o, en su defecto, hacer uso de escenarios de riesgo retrospectivos.

5. CONCLUSIONES

La experiencia de la sequía del 2010-2012 en el norte de México hizo necesario cambiar nuestra forma de concebir la sequía sólo en términos de las anomalías de lluvia para poder entenderla en un contexto de gestión del riesgo climático. Las sequías estudiadas de esta manera combinan tanto las características del peligro (sequía meteorológica) como de la vulnerabilidad, eliminando el enfoque naturalista. La caracterización del peligro implica definir las características del fenómeno climático que producen un incremento del riesgo a niveles intolerables como para que la probabilidad del desastre se materialice. Caracterizar la vulnerabilidad implica identificar los problemas estructurales en el modelo de desarrollo de la región o del sector afectado y del aprovechamiento de los recursos para explicar la magnitud del desastre.

Los desastres pueden considerarse como una expresión del riesgo por encima de un valor umbral crítico. Pero establecer cuánto es mucho o poco riesgo requiere cuantificaciones a partir de elementos medibles, tales como la vulnerabilidad física, social o económica. La metodología sugerida en este trabajo se enfocó en evaluar la vulnerabilidad y el riesgo del sector hídrico ante la ocurrencia de sequías, a través de indicadores que reflejan las causas de la vulnerabilidad y que combinados resultan en un índice de riesgo cuyo valor muestra si se trata de una condición de vulnerabilidad baja, media o alta.

La metodología se aplicó para el caso del sector hídrico en México, usando como escala espacial de análisis las RHAs de la CONAGUA. El uso de las RHAs es útil ya que combina la estructura de la cuenca hidrológica y el nivel de decisión administrativa para la planificación y definición de políticas públicas. Si bien, las causas de la vulnerabilidad son multifactoriales, se utilizaron seis indicadores que reflejan los aspectos económicos, físicos y sociales asociados a la vulnerabilidad ante las sequías, los cuales contemplan de manera dinámica las debilidades y fortalezas que se han ido construyendo con el tiempo. A través de la evaluación de la vulnerabilidad se pueden explicar los contrastes espaciales y temporales de las sequías hidrológicas y agrícolas en el norte de México, donde el déficit de agua es un problema constante. En la mayoría de las regiones del sur del país, la evaluación del modelo de riesgo fue complicada ya que las condiciones de manejo del agua en los sectores de hidrología y agricultura son contrastantes a los del norte. Por lo tanto, los indicadores de vulnerabilidad propuestos funcionan mejor para el centro y norte de México. La

vulnerabilidad es una condición que en general varía más lentamente que la amenaza y por lo tanto es un modulador del riesgo y los desastres.

No se debe perder de vista que el problema de la sequía en México se enmarca en un contexto de crisis de agua que se viene agravando con el tiempo, a pesar de que el recurso se considera prioridad nacional desde hace varios años. Las estructuras socioeconómicas siguen demandando más agua que la que el ambiente puede entregar (se supera la capacidad de carga de las cuencas). Por ello, la sobreexplotación de acuíferos y de agua superficial es una práctica común, que deriva en la necesidad de contar con una verdadera estrategia de manejo sustentable del recurso, al igual que de muchos otros servicios naturales.

Un aspecto que distingue la metodología propuesta es que pone a prueba los factores de vulnerabilidad mediante la comparación de la estimación del riesgo con datos de impactos en los sectores hídrico y agrícola. De esta forma, se encontró que la vulnerabilidad tiende a modular la componente de baja frecuencia de los riesgos y la actividad de desastres, mientras que el peligro generalmente corresponde al componente de alta frecuencia, el cual está ligado a la variabilidad interanual del clima.

El uso de la información de la amenaza en la evaluación del riesgo puede servir para definir medidas estructurales contra la sequía meteorológica. Sin embargo, el uso del valor del peligro puede servir para aplicar medidas de gestión de riesgos no estructurales, tales como los sistemas de alerta temprana ante sequías. Este enfoque podría también ser útil para la estimación de los efectos de la sequía en México y así servir como una guía para los esfuerzos de monitoreo de la sequía. En particular, la comparación del riesgo de sequía entre las regiones y el análisis de cómo la vulnerabilidad ha evolucionado en cada una de ellas en los años recientes podría influir en las políticas públicas orientadas a prevenir los impactos de las sequías meteorológicas. De manera más proactiva, lo ideal, es comenzar a usar los pronósticos climáticos en conjunto con los escenarios de riesgo.

Los resultados obtenidos muestran que el riesgo del sector hídrico ante sequías ha disminuido en relación con el aumento en la magnitud y frecuencia del peligro climático, en buena medida por las acciones de la sociedad y el gobierno. Sin embargo, las sequías volverán a presentarse y, ante ello, hay que contar con planes para actuar antes, durante y después del evento. Un sistema de alerta temprana ante

la sequía definiría las acciones coordinadas entre diferentes actores para evitar los altos costos sociales, económicos y ambientales del fenómeno. Las alertas de una condición de sequía deben ser emitidas considerando la confianza en la información, y las capacidades y arreglos entre actores clave, así como el proceso y las decisiones que pueden ser tomadas por el sector o sectores involucrados.

Los resultados de este trabajo muestran que a nivel nacional y regional, el gran reto que afronta y afrontará México en las décadas por venir están relacionadas con problemas las sequías meteorológica, hidrológica, agrícola y social. Por lo que, una buena gestión de riesgo a través del uso de la información climática y la reducción de vulnerabilidad se traducirá en seguridad de las personas y en mejores condiciones para el desarrollo de un sector como el del agua. La claridad en la identificación de los factores de riesgo, y en particular de los que generan vulnerabilidad, permitirá encontrar los elementos que pueden cambiarse mediante acciones preventivas.

Siguientes pasos en el trabajo sobre sequía

A pesar de la importancia que la sequía tiene para México, son pocos los estudios dirigidos a entender la relación causa-efecto de sus impactos. Una mejor comprensión de los procesos físicos que producen las sequías meteorológicas resulta esencial para contextualizar sus efectos espacio-temporales y así su vínculo con las sequías hidrológica, agrícola y social.

Un aspecto que resaltó a partir de los resultados tanto del índice de vulnerabilidad como de riesgo, es que la caracterización de la sequía meteorológica debe tomar en cuenta el contraste climático del país entre el sur, con precipitaciones importantes, y el norte, con un clima árido. De esta forma, el monitoreo y las predicciones deberán enfocarse en presentar detalles para identificar el inicio, la intensidad, la duración, la extensión y el término de un episodio de sequía.

Por otra parte, resulta necesario desarrollar índices de seguimiento de los diferentes tipos de sequía que sirvan de apoyo y guíen el proceso de toma de decisiones. Para ello, se debe contar con un mejor entendimiento de los procesos que llevan a una sequía meteorológica a convertirse en una sequía hidrológica, agrícola o social. En el caso del sector hídrico, el enfoque debe determinar la disponibilidad del recurso agua tanto en años con y sin sequía, para así planear su distribución y manejo.

Con la finalidad de implementar medidas no sólo de respuesta, sino de reducción de la vulnerabilidad de las regiones, sectores y grupos sociales, es necesario desarrollar predicciones de sequía en el mediano y largo plazo, e incorporarlas en un esquema de gestión del riesgo como el propuesto en este trabajo. Las predicciones, incluyendo los niveles de incertidumbre asociada, deben ser usadas en los modelos hidrológicos y agrícolas, los modelos deben ajustarse a cada una de las RHA, e incluso a nivel de sub-cuencas, con el fin de contar con información de mayor resolución espacial.

Planear con base en la disponibilidad del recurso requiere estimar la cantidad disponible, así como la demanda. Para lo anterior, será necesario un monitoreo de los diversos elementos que componen el ciclo hidrológico a nivel RHA, que lleve a generar escenarios anuales de disponibilidad, desarrollar proyectos de sustentabilidad en el sector y promover conciencia sobre las ventajas de usar la información del clima como herramienta de gestión y prevención ante sequías.

6. ANEXO I. DATOS

Fuente: SINA-CONAGUA, 2016. <http://201.116.60.25/sina/>

- Grado de presión sobre el recurso agua (GP)

Tabla 11. Datos normalizados del indicador GP

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	0.48	0.43	0.43	0.43	0.38	0.38	0.38	0.37	0.34	0.39	0.39	0.34	0.40
II	0.38	0.39	0.39	0.40	0.44	0.46	0.46	0.45	0.47	0.43	0.42	0.38	0.41
III	0.17	0.21	0.21	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21
IV	0.16	0.18	0.18	0.18	0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.23	0.23	0.23	0.24
V	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
VI	0.25	0.28	0.30	0.36	0.38	0.38	0.39	0.38	0.35	0.37	0.37	0.36	0.39
VII	0.46	0.27	0.27	0.28	0.23	0.25	0.24	0.24	0.24	0.23	0.23	0.23	0.24
VIII	0.19	0.16	0.18	0.18	0.20	0.20	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22
IX	0.09	0.09	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11
X	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
XI	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
XII	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07
XIII	0.63	0.59	0.60	0.60	0.77	0.78	0.66	0.66	0.66	0.68	0.68	0.69	0.69

Tabla 12. Datos sin normalizar del indicador GP

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	0.97	0.85	0.86	0.86	0.76	0.76	0.76	0.73	0.68	0.78	0.78	0.69	0.80
II	0.76	0.77	0.78	0.80	0.87	0.92	0.91	0.91	0.94	0.87	0.84	0.76	0.81
III	0.33	0.42	0.42	0.41	0.40	0.40	0.41	0.41	0.40	0.40	0.40	0.39	0.42
IV	0.32	0.35	0.36	0.37	0.50	0.50	0.49	0.49	0.47	0.46	0.47	0.47	0.49
V	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05
VI	0.50	0.56	0.60	0.72	0.76	0.76	0.77	0.76	0.70	0.73	0.74	0.72	0.77
VII	0.93	0.53	0.55	0.55	0.45	0.49	0.49	0.49	0.47	0.46	0.46	0.47	0.48
VIII	0.38	0.32	0.36	0.36	0.40	0.41	0.41	0.42	0.42	0.41	0.42	0.42	0.44
IX	0.18	0.17	0.19	0.20	0.18	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.21	0.21
X	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
XI	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
XII	0.07	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.13	0.14
XIII	1.26	1.17	1.20	1.19	1.54	1.55	1.32	1.33	1.32	1.36	1.36	1.38	1.38

Tabla 13. Agua renovable media (Hm³/año)

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	4425	4423	4423	4423	4600	4616	4626	4667	5021	4932	4999	4999	4958
II	7957	8214	8213	8213	7944	8204	8323	8499	8231	8392	8325	8325	8273
III	2446	2474	2483	2507	2568	2562	2562	2563	2591	2593	2593	2593	2559
IV	2891	2890	2892	2833	2127	2165	2168	2168	2199	2289	2289	2289	2215
V	3313	3317	3250	3222	3249	3279	3279	3282	3268	3235	3235	3235	3056
VI	1426	1371	1418	1247	1193	1202	1193	1216	1302	1275	1275	1275	1231
VII	6823	6836	6841	6846	8394	7780	7884	7898	8163	8065	8065	8065	7849
VIII	3680	3968	3697	3702	3400	3403	3416	3453	3434	3575	3575	3575	3509
IX	2362	2334	2334	2328	2561	2550	2554	2556	2609	2811	2811	2811	2808
X	1025	1025	1025	1025	1027	9545	9586	9586	9408	9512	9512	9512	9512
XI	1559	1579	1582	1581	1577	1577	1577	1577	1594	1638	1638	1638	1444
XII	2649	2906	2964	2964	2964	2964	2964	2964	2959	2985	2985	2985	2932
XIII	3805	3803	3934	3934	3009	3008	3514	3513	3515	3468	3468	3468	3458

Tabla 14. Volumen total de agua concesionado (Hm³/año)

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	4285	3780	3807	3819	3493	3504	3510	3420	3412	3861	3895	3434	3949
II	6013	6351	6419	6608	6917	7573	7609	7703	7702	7268	6989	6317	6715
III	8163	1038	1049	1034	1028	1037	1043	1041	1037	1039	1046	1022	1073
IV	9328	1016	1041	1047	1056	1077	1070	1070	1038	1061	1065	1070	1078
V	1473	1350	1264	1268	1279	1343	1351	1363	1374	1438	1508	1510	1539
VI	7071	7642	8539	9038	9112	9191	9234	9243	9154	9326	9397	9145	9513
VII	6321	3639	3745	3779	3807	3834	3833	3846	3862	3716	3734	3761	3801
VIII	1381	1280	1321	1334	1366	1387	1416	1447	1454	1467	1504	1501	1529
IX	4186	3990	4503	4549	4588	4681	4747	4854	4911	5413	5630	5777	5899
X	3733	4535	4622	4751	4929	4867	4957	4973	4856	4896	5076	4931	5449
XI	1553	1944	1999	1986	2040	2129	2190	2203	2217	2299	2273	2241	2337
XII	1838	1601	1708	1872	1997	2134	2368	2731	2790	2976	3353	3814	4149
XIII	4784	4461	4706	4686	4643	4665	4650	4658	4633	4718	4720	4779	4771

- Acuíferos contaminados (AC)

Tabla 15. Datos normalizados del indicador AC

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	0.22	0.20	0.18	0.18	0.18	0.18	0.20	0.20	0.26	0.26	0.28	0.28	0.28
II	0.36	0.35	0.37	0.37	0.32	0.29	0.29	0.29	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
III	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
IV	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02
V	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
VI	0.13	0.17	0.17	0.16	0.16	0.15	0.14	0.15	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18
VII	0.30	0.32	0.33	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.32	0.32	0.35	0.35	0.35
VIII	0.20	0.23	0.24	0.24	0.27	0.27	0.25	0.24	0.24	0.24	0.25	0.25	0.25
IX	0.10	0.07	0.07	0.08	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
X	0.10	0.09	0.10	0.05	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
XI	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
XII	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
XIII	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.27	0.29	0.29	0.29

Tabla 16. Número total de acuíferos

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	87	87	87	87	87	87	87	87	88	88	88	88	88
II	64	63	63	63	63	63	63	63	62	62	62	62	62
III	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
IV	43	42	43	47	47	46	46	46	46	45	46	46	46
V	38	38	38	34	34	35	35	35	35	36	35	35	35
VI	97	96	96	100	100	100	100	100	102	102	102	102	102
VII	71	72	72	68	68	68	68	68	65	65	65	65	65
VIII	127	126	126	127	127	127	127	127	129	128	129	129	129
IX	41	42	41	40	40	40	40	40	39	39	39	39	39
X	21	22	21	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
XI	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
XII	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
XIII	14	14	14	14	14	14	14	14	14	15	14	14	14

Tabla 17. Número total de acuíferos sobreexplotados

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	10	8	7	7	7	7	8	8	13	13	15	15	15
II	18	17	18	18	15	13	13	13	10	10	10	10	10
III	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
IV	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1
V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VI	13	16	16	16	16	15	14	15	17	17	18	18	18
VII	21	23	24	24	24	24	24	24	21	21	23	23	23
VIII	24	28	29	29	33	33	32	30	31	31	32	32	32
IX	4	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1
X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XIII	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Tabla 18. Número total de acuíferos con intrusión salina

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	9	9	9	9	9	9	9	9	10	10	10	10	10
II	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
III	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VIII	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
IX	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X	2	2	2	1	2	2	2	2	2	0	0	0	0
XI	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XIII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

- Agua municipal tratada (AT)

Tabla 19. Datos normalizados del indicador AT

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	0.65	0.65	0.63	0.63	0.49	0.44	0.41	0.14	0.43	0.50	0.54	0.55	0.55
II	0.91	0.91	0.90	0.90	0.91	0.90	0.90	0.91	0.90	0.89	0.82	0.79	0.80
III	0.72	0.71	0.73	0.69	0.67	0.70	0.67	0.65	0.63	0.62	0.62	0.62	0.61
IV	0.82	0.82	0.83	0.84	0.83	0.84	0.83	0.81	0.80	0.78	0.81	0.80	0.80
V	0.74	0.74	0.74	0.73	0.73	0.85	0.81	0.68	0.66	0.68	0.73	0.71	0.71
VI	0.27	0.56	0.54	0.45	0.44	0.42	0.41	0.42	0.43	0.42	0.41	0.42	0.39
VII	0.90	0.78	0.77	0.71	0.70	0.66	0.66	0.62	0.60	0.59	0.60	0.54	0.55
VIII	0.81	0.79	0.79	0.77	0.76	0.73	0.72	0.72	0.71	0.68	0.67	0.60	0.55
IX	0.95	0.95	0.95	0.90	0.89	0.88	0.86	0.85	0.78	0.73	0.86	0.87	0.87
X	0.96	0.95	0.88	0.89	0.89	0.89	0.87	0.83	0.80	0.76	0.76	0.76	0.77
XI	0.93	0.92	0.88	0.85	0.85	0.82	0.82	0.84	0.83	0.83	0.83	0.83	0.84
XII	0.92	0.92	0.89	0.88	0.88	0.88	0.88	0.90	0.89	0.89	0.90	0.89	0.89
XIII	0.90	0.91	0.91	0.91	0.91	0.92	0.91	0.90	0.90	0.89	0.90	0.90	0.89

Tabla 20. Volumen de agua pública residual tratada (m³/s)

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	4.65	4.65	4.84	4.81	5.27	5.77	6.11	6.68	7.76	6.8	6.39	6.52	6.56
II	2.41	2.62	2.65	2.67	2.67	3.09	3.18	2.92	3.06	3.13	3.34	3.75	3.75
III	4.23	4.45	4.67	5.47	5.76	6.16	6.60	7.04	7.43	7.62	7.75	7.72	7.88
IV	4.18	4.28	4.53	4.30	4.60	5.13	5.50	6.10	6.51	7.2	7.33	7.76	7.79
V	2.14	2.15	2.17	2.31	2.33	1.58	1.98	3.39	3.73	3.5	3.51	3.74	3.74
VI	15.55	16.32	17.00	20.62	20.95	21.78	22.23	21.68	21.27	21.68	22.13	23.02	24.03
VII	1.17	2.58	2.69	3.39	3.52	4.01	4.03	4.50	4.69	4.75	4.79	5.43	5.37
VIII	11.65	12.55	12.87	13.98	14.90	17.27	18.02	18.58	19.45	21.62	23.05	26.52	30.5
IX	0.68	0.68	0.69	1.53	1.67	1.95	2.31	2.54	3.70	4.42	4.31	4.27	4.22
X	1.00	1.17	2.78	2.58	2.50	2.64	3.14	4.06	4.58	5.34	5.59	5.59	5.32
XI	0.90	1.16	1.72	2.10	2.16	2.50	2.67	2.37	2.48	2.47	2.55	2.58	2.52
XII	1.21	1.21	1.53	1.80	1.71	1.72	1.73	1.90	1.96	1.97	1.98	1.98	2.03
XIII	6.39	6.40	6.41	6.23	6.33	5.70	6.14	6.35	6.98	7.14	7.02	7.05	7.55

Tabla 21. Volumen de agua concesionada para abastecimiento público urbano (Hm³/año)

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	416	415.8	416	416	328.2	327.4	327.5	247	432	432	443	457.1	461.9
II	874	874.8	873	876.8	967.5	976.7	983.6	1064	924	924	580	575.5	580.9
III	480	480.4	550	550.8	550.8	640.9	639.3	639	640	640	641	643	643
IV	728	735.7	837	842.4	851.3	1014.	997.5	1009	1012	1012	1251	1243	1218
V	262	263	267	270	275.7	331.7	333.1	335	350	350	405	406	412
VI	671	1178.	1179	1181.	1178.	1182.	1182.	1183	1178	1178	1192	1248	1248
VII	359	365.4	365	366.8	367.2	370.1	371.1	371	370	370	374	376	381
VIII	1895	1913.	1923	1932.	1967.	2002.	2057.	2121	2135	2135	2182	2105	2139
IX	396	476.1	475	475	475.5	524.7	526	528	524	524	1001	1002	1018
X	730	736.6	740	741.2	741.2	742.9	744	744	714	714	723	723	723
XI	430	440.5	439	443.3	444.8	446	456.9	459	457	457	464	468	484
XII	456	458.4	459	460.2	460.4	462.1	471	588	590	590	600	588	611
XIII	1936	2143.	2147	2147.	2133.	2137.	2106.	2107	2118	2118	2127	2128	2134

- Tarifa óptima de consumo de agua en ciudades (TO)

Tabla 22. Datos normalizados para el indicador TO

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	0.80	0.76	0.73	0.69	0.66	0.60	0.59	0.54	0.49	0.47	0.45	0.41	0.39
II	0.94	0.92	0.91	0.90	0.88	0.87	0.85	0.83	0.83	0.81	0.81	0.81	0.70
III	0.88	0.88	0.87	0.86	0.86	0.89	0.89	0.85	0.85	0.83	0.82	0.79	0.75
IV	0.84	0.82	0.79	0.76	0.74	0.76	0.76	0.62	0.61	0.59	0.57	0.56	0.29
V	0.91	0.88	0.85	0.82	0.80	0.78	0.78	0.69	0.68	0.67	0.63	0.61	0.60
VI	0.90	0.87	0.84	0.81	0.79	0.81	0.78	0.71	0.71	0.69	0.62	0.60	0.59
VII	0.73	0.72	0.72	0.72	0.71	0.80	0.78	0.74	0.72	0.70	0.69	0.69	0.72
VIII	0.97	0.90	0.82	0.74	0.67	0.53	0.49	0.34	0.26	0.21	0.21	0.15	0.13
IX	0.92	0.90	0.89	0.87	0.86	0.87	0.85	0.79	0.77	0.78	0.77	0.76	0.77
X	0.95	0.90	0.85	0.80	0.74	0.85	0.85	0.55	0.61	0.47	0.43	0.41	0.45
XI	0.98	0.96	0.95	0.94	0.93	0.98	0.96	0.92	0.95	0.95	0.86	0.78	0.80
XII	0.85	0.83	0.81	0.79	0.77	0.82	0.82	0.79	0.77	0.64	0.64	0.59	0.58
XIII	0.93	0.89	0.85	0.80	0.76	0.90	0.85	0.84	0.54	0.52	0.50	0.41	0.39

Tabla 23. Tarifas de agua para uso domestico tipo residencial

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	6.62	7.75	8.89	10.02	11.15	12.92	13.42	14.94	16.51	17.34	17.95	19.24	19.92
II	2.05	2.47	2.90	3.32	3.75	4.29	4.9	5.48	5.48	6.29	6.29	6.29	9.64
III	3.82	4.03	4.24	4.44	4.65	3.56	3.72	4.75	4.99	5.41	5.9	6.96	7.99
IV	5.04	5.92	6.81	7.69	8.58	7.64	7.65	12.2	12.7	13.43	13.89	14.32	23.12
V	2.95	3.87	4.78	5.70	6.61	7.15	7.15	10.03	10.35	10.81	12.11	12.72	12.95
VI	3.34	4.24	5.15	6.05	6.95	6.03	7.18	9.53	9.42	9.99	12.37	13.09	13.32
VII	8.85	8.97	9.09	9.21	9.33	6.38	7.01	8.31	9.16	9.6	10.05	10.05	9.08
VIII	0.92	3.38	5.85	8.31	10.78	15.43	16.59	21.34	24.18	25.57	25.57	27.61	28.15
IX	2.72	3.20	3.69	4.17	4.66	4.3	5.01	6.97	7.51	7.25	7.56	7.85	7.53
X	1.57	3.25	4.94	6.62	8.30	4.91	4.91	14.58	12.81	17.21	18.4	19.23	17.78
XI	0.78	1.14	1.51	1.87	2.24	0.74	1.26	2.74	1.62	1.62	4.42	7.24	6.35
XII	4.78	5.49	6.20	6.90	7.61	5.79	5.79	6.95	7.33	11.86	11.86	13.19	13.52
XIII	2.21	3.61	5.00	6.40	7.79	3.25	4.95	5.26	15	15.61	16.17	19.09	19.98

Nota: para el periodo 2003-2006 se interpolaron las tarifas de los años 2002 y 2012

Tabla 24. Ciudades representativas para el impacto de la sequía agrícola por RHA.

RHA	Ciudad
I	Tijuana
II	Hermosillo
III	Culiacán
IV	Puebla
V	Acapulco
VI	Monterrey
VII	Torreón
VIII	Morelia
IX	Tampico
X	Xalapa
XI	Oaxaca
XII	Cancún
XIII	DF

- Productividad del agua (PA)

Fuente: IMTA-CONAGUA, 2016. Estadísticas Agrícolas de los Distritos.

<http://www.edistritos.com/estadisticas/>

Tabla 25. Datos normalizados para el indicador PA

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	0.85	0.85	0.86	0.87	0.88	0.86	0.83	0.81	0.80	0.76	0.72	0.71	0.70
II	0.83	0.84	0.76	0.76	0.79	0.76	0.69	0.67	0.69	0.72	0.51	0.52	0.53
III	0.85	0.81	0.77	0.82	0.83	0.77	0.77	0.76	0.74	0.81	0.55	0.60	0.64
IV	0.93	0.90	0.91	0.91	0.89	0.89	0.87	0.88	0.83	0.84	0.81	0.80	0.79
V	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.94	0.94	0.95	0.94	0.93	0.92	0.93	0.92
VI	0.90	0.87	0.73	0.88	0.89	0.83	0.82	0.86	0.77	0.83	0.76	0.71	0.69
VII	0.92	0.89	0.87	0.81	0.81	0.84	0.83	0.84	0.85	0.77	0.76	0.84	0.81
VIII	0.83	0.82	0.80	0.85	0.81	0.74	0.74	0.76	0.66	0.65	0.52	0.75	0.62
IX	0.86	0.84	0.83	0.84	0.86	0.75	0.76	0.79	0.59	0.70	0.60	0.72	0.54
X	0.90	0.91	0.89	0.88	0.87	0.88	0.87	0.87	0.81	0.83	0.76	0.83	0.80
XI	0.85	0.85	0.83	0.81	0.78	0.73	0.75	0.66	0.56	0.30	0.38	0.37	0.32
XII	0.79	0.77	0.75	0.70	0.67	0.53	0.58	0.58	0.33	0.30	0.04	0.28	0.21
XIII	0.91	0.91	0.91	0.92	0.92	0.92	0.88	0.91	0.86	0.83	0.67	0.81	0.82

Tabla 26. Datos sin normalizar para el indicador PA

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	1.82	1.83	1.74	1.53	1.48	1.74	2.10	2.26	2.38	2.93	3.33	3.43	3.64
II	2.04	1.95	2.89	2.93	2.48	2.92	3.71	4.02	3.72	3.40	5.83	5.76	5.62
III	1.82	2.26	2.76	2.20	2.02	2.81	2.80	2.87	3.17	2.31	5.44	4.85	4.30
IV	0.85	1.19	1.02	1.06	1.29	1.37	1.51	1.46	2.02	1.96	2.28	2.42	2.49
V	0.46	0.51	0.48	0.47	0.50	0.67	0.70	0.66	0.76	0.82	0.92	0.84	1.00
VI	1.20	1.61	3.20	1.46	1.35	2.02	2.17	1.71	2.72	2.10	2.93	3.47	3.75
VII	1.00	1.31	1.53	2.22	2.28	1.94	2.09	1.94	1.79	2.74	2.90	1.91	2.22
VIII	2.03	2.14	2.39	1.82	2.25	3.07	3.17	2.93	4.14	4.24	5.77	2.98	4.54
IX	1.71	1.87	2.09	1.92	1.70	3.04	2.87	2.57	4.94	3.56	4.84	3.35	5.57
X	1.16	1.12	1.28	1.50	1.60	1.47	1.60	1.56	2.33	2.02	2.89	2.09	2.35
XI	1.84	1.83	1.99	2.25	2.70	3.25	3.02	4.05	5.34	8.44	7.46	7.57	8.18
XII	2.58	2.76	3.01	3.63	3.91	5.59	5.08	4.99	8.03	8.34	11.51	8.66	9.49
XIII	1.10	1.09	1.05	0.92	0.96	1.00	1.40	1.13	1.64	2.10	3.93	2.33	2.17

Tabla 27. Producción (Miles de Ton)

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	3162.	3195.	3591.	3169.	2726.	1945.	2106.	2325.	2276.	2061.	3738.	3,747	3,551
II	2827.	2567.	1806.	2579.	3010.	3097.	3176.	3173.	3475.	2959.	3509.	4,161	4,098
III	8491.	7384.	8974.	9296.	1108	1178	1201	1046	1044	8511.	9126.	9,548	9,163
IV	3295.	3796.	3376.	3603.	3482.	3642.	3905.	3308.	3521.	3658.	3591.	3,531	3,599
V	459.6	447.1	463.5	457.3	498.6	478.0	470.4	444.8	558.4	516.1	560.0	568.3	606.9
VI	1174.	1956.	2271.	2254.	2387.	3099.	2827.	3030.	3084.	2883.	4140.	3,249	4,078
VII	325.1	835.4	1229.	1231.	1256.	1948.	1968.	2305.	1864.	2024.	1894.	1,089	1,492
VIII	6390.	6269.	6507.	6365.	6183.	6602.	6858.	6975.	5855.	7064.	6815.	7,166	6,879
IX	3855.	4219.	4193.	4568.	4563.	4010.	4338.	4546.	4264.	4678.	4836.	5,060	4,532
X	2204.	2141.	2137.	2677.	2408.	2209.	2036.	2101.	2085.	1968.	2442.	2,215	2,324
XI	1154.	1181.	1258.	1213.	1178.	1218.	1217.	1271.	1294.	1373.	1592.	1,653	1,678
XII	501.8	638.0	561.6	312.8	395.0	359.7	386.0	364.3	458.9	592.0	651.3	696.7	692.9
XIII	3110.	3653.	3498.	4053.	3790.	4003.	4111.	3984.	4190.	4158.	4760.	4,344	4,740

Tabla 28. Volumen total de agua distribuida (Miles de m³)

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	2519	2519	2544	2579	2753	2745	3062	2734	2698	2788	2536	2,522	2,556
II	3789	3471	2269	3103	3891	3817	3865	3941	3901	4482	3782	3,979	3,932
III	7583	5827	6399	7964	9317	9201	9988	9811	9326	1185	5835	6,786	7,959
IV	2665	2671	2830	2982	2470	2441	2433	2447	2155	2407	2350	2,199	2,127
V	7027	6727	6460	6640	7473	6212	5265	5385	5433	5606	6168	648,4	593,6
VI	1263	1673	1134	2462	2726	2530	2887	3261	2330	3589	3137	2,212	2,311
VII	2690	5064	8320	7151	7575	9452	9443	1023	1100	1148	9565	600,0	796,1
VIII	3352	3108	3336	4082	3457	3369	3697	4141	2643	3847	2846	2,848	2,986
IX	1411	1329	1226	1479	1851	9975	1226	1520	8990	1437	1050	1,356	790,7
X	7097	7460	6867	7601	6953	7027	6526	7961	6283	7244	6382	581,0	536,2
XI	3300	3649	3697	3337	3002	2927	3113	3537	3341	3396	3501	353,6	338,2
XII	1415	1653	1371	4784	5606	4659	4995	6606	6365	8068	7153	87,88	72,93
XIII	1422	1273	1290	1401	1375	1446	1405	1581	1409	1513	1503	1,432	1,493

Tabla 29. Precio Medio Rural (\$/Ton)

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	1453.	1442.	1229.	1247.	1493.	2451.	3048.	2653.	2825.	3966.	2258.	2,312	2,621
II	2730.	2635.	3636.	3526.	3202.	3602.	4512.	4986.	4173.	5151.	6278.	5,509	5,390
III	1623.	1787.	1967.	1881.	1700.	2194.	2331.	2688.	2828.	3223.	3480.	3,443	3,732
IV	690.4	840.5	855.6	873.8	914.5	920.9	941.5	1076.	1235.	1288.	1489.	1,506	1,468
V	696.2	763.2	672.9	689.2	752.7	866.6	785.3	798.1	735.6	888.7	1009.	956.7	978.8
VI	1286.	1373.	1600.	1593.	1543.	1652.	2218.	1844.	2056.	2610.	2218.	2,362	2,127
VII	830.0	793.4	1034.	1291.	1372.	942.0	1005.	859.6	1054.	1555.	1464.	1,051	1,185
VIII	1064.	1059.	1227.	1166.	1259.	1567.	1709.	1739.	1867.	2309.	2410.	1,185	1,970
IX	626.8	589.5	611.1	620.5	691.5	755.9	811.3	859.0	1041.	1093.	1051.	897.1	971.8
X	372.8	391.0	411.5	425.9	460.7	468.4	513.4	590.8	703.3	744.5	754.3	547.3	541.1
XI	525.4	566.3	586.2	619.4	687.2	779.9	772.8	1126.	1378.	2086.	1640.	1,618	1,648
XII	727.1	715.3	735.9	555.0	554.6	723.9	657.7	905.2	1113.	1137.	1264.	1,092	998.7
XIII	504.0	381.0	385.8	316.8	347.8	361.3	477.2	450.6	551.8	763.8	1241.	767.5	685.3

- Capacidad de almacenamiento de presas (AP)

Tabla 30. Datos normalizados para el indicador AP

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00
II	0.95	0.96	0.91	0.86	0.86	0.84	0.82	0.82	0.77	0.85	0.85	0.80	0.78
III	0.91	0.90	0.75	0.78	0.77	0.76	0.75	0.78	0.77	0.92	0.90	0.83	0.81
IV	0.76	0.73	0.75	0.78	0.75	0.80	0.77	0.79	0.77	0.78	0.81	0.77	0.76
V	0.86	0.85	0.86	0.84	0.87	0.91	0.84	0.86	0.84	0.85	0.86	0.86	0.90
VI	0.84	0.78	0.73	0.75	0.77	0.75	0.66	0.73	0.67	0.79	0.88	0.81	0.83
VII	0.97	0.91	0.89	0.91	0.85	0.88	0.81	0.83	0.83	0.90	0.92	0.89	0.90
VIII	0.88	0.85	0.86	0.88	0.84	0.85	0.85	0.86	0.85	0.88	0.89	0.86	0.86
IX	0.85	0.77	0.82	0.82	0.84	0.82	0.79	0.82	0.76	0.79	0.83	0.77	0.78
X	0.68	0.57	0.69	0.62	0.63	0.70	0.64	0.64	0.64	0.73	0.74	0.66	0.70
XI	0.58	0.51	0.52	0.39	0.47	0.42	0.48	0.57	0.49	0.49	0.54	0.46	0.51
XII													
XIII	0.90	0.89	0.90	0.90	0.90	0.89	0.90	0.90	0.88	0.91	0.87	0.86	0.86

Tabla 31. Datos sin normalizar para el indicador AP

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	0.06	0.06	0.08	0.24	0.15	0.09	0.07	0.05	0.09	0.07	0.04	0.00	0.00
II	0.53	0.39	0.85	1.35	1.37	1.57	1.82	1.76	2.33	1.52	1.47	1.96	2.22
III	0.93	0.95	2.48	2.17	2.26	2.44	2.55	2.24	2.29	0.79	0.99	1.73	1.90
IV	2.38	2.67	2.49	2.21	2.48	2.01	2.29	2.12	2.29	2.23	1.93	2.31	2.43
V	1.39	1.54	1.41	1.59	1.27	0.91	1.61	1.41	1.59	1.47	1.38	1.43	1.03
VI	1.63	2.18	2.73	2.46	2.32	2.53	3.40	2.74	3.35	2.11	1.22	1.89	1.74
VII	0.30	0.91	1.13	0.90	1.47	1.21	1.87	1.71	1.67	1.04	0.78	1.10	1.04
VIII	1.22	1.47	1.44	1.22	1.55	1.47	1.55	1.40	1.52	1.20	1.13	1.39	1.43
IX	1.52	2.35	1.84	1.82	1.61	1.80	2.14	1.85	2.43	2.10	1.74	2.27	2.22
X	3.21	4.26	3.09	3.78	3.75	3.03	3.58	3.56	3.60	2.75	2.63	3.41	3.03
XI	4.16	4.87	4.75	6.11	5.31	5.77	5.17	4.30	5.05	5.13	4.61	5.40	4.93
XII													
XIII	0.99	1.05	1.01	0.95	1.04	1.05	0.97	0.97	1.24	0.91	1.26	1.36	1.39

Tabla 32. Porcentaje de agua almacenada en presas principales

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	15	11.5	16.3	50	28.5	17.9	13.7	8.4	17.1	14.2	8.6	0.2	0.3
II	19	14.6	32.3	52.8	56.2	70.3	81.9	80	105.9	65.3	60.6	73.1	88
III	23.9	31	81.5	70.2	72.7	79.4	83.4	73.2	74.4	25.7	32.3	55.6	64
IV	63.7	77.8	74.3	66.4	75.3	62.2	70.3	65	68.2	67.7	59	71	75
V	93.8	94.9	81.7	92.2	74.4	55.7	99.6	87.8	100.2	97.1	95.3	99.1	72.3
VI	36.9	53.3	74.6	71	67.5	74.5	100.3	81	98	62.9	36.7	55.3	53
VII	28.9	50.3	64	51.2	84.5	70.2	108.4	99.7	97.8	58.5	44.1	62.9	60
VIII	67.6	75.5	76.6	65.5	85.3	82.3	88.1	81.3	88.7	71.1	68.2	84.1	88
IX	48.6	71.4	63.3	63	56.2	64.2	77.5	68.3	91.1	86.7	74.8	100	100
X	54.4	87.6	64.7	81.5	83.8	67	80.6	80.4	79.3	61	60.6	76.4	75
XI	61.6	90.3	90.6	115.8	103.4	117.2	107.9	90.3	106.9	112.5	100	115.4	110
XII													
XIII	69.1	68.5	69.4	65.3	70.4	71.8	65.8	66.3	83.6	62.4	86.7	95.1	97

Tabla 33. Datos por RHA relacionados al indicador PA

RHA	Porcentaje de uso del agua por fuente superficial	Porcentaje de uso del agua por fuente subterránea	Número de presas	Vol. NAMO (Hm3)	Principales usos*
I	50	50	1	92	A, C
II	17	83	8	8447	I, G, C, A
III	67	33	17	15940	I, G, C, A
IV	28	72	16	17418	I, G, C, A
V	19	81	2	1091	I, C
VI	22	78	16	15619	I, G, C, A
VII	49	51	3	3300	I, C
VIII	40	60	27	12413	I, G, C, A
IX	13	87	5	6550	I, G, A
X	34	66	5	11008	I, G, C,
XI	50	50	4	26181	I, G, C,
XII	97	3			
XIII	47	53	8	342	I, C

* G: Generación de energía eléctrica, I: Irrigación, A: Uso abastecimiento público, C: Control de avenidas.

- Índice estandarizado de precipitación (SPI)

Base de datos: SPI-CAMS_OPI_12 meses, IRI, 2015.

Tabla 34. SPI sin normalizar

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	-1.33	-0.05	0.33	-0.27	-0.06	0.03	0.33	-0.49	-0.39	-0.86	0.21	0.35	0.23
II	-2.26	-0.19	0.31	-0.44	-0.07	-0.05	0.40	-0.51	-0.31	-1.00	-0.06	0.43	0.23
III	-1.61	0.15	0.90	-0.57	0.52	0.03	0.70	0.04	0.15	-0.35	0.32	0.78	0.62
IV	-1.56	-0.01	-0.10	-0.19	0.06	0.18	0.34	-0.24	1.03	-0.43	0.29	1.23	0.10
V	-1.35	0.15	-0.03	0.20	0.88	0.31	0.79	-0.22	1.42	0.44	0.36	1.08	0.43
VI	-0.58	0.04	1.34	-0.34	-0.07	0.91	0.01	-0.11	0.42	-2.04	-0.42	0.41	-0.03
VII	-1.41	0.41	0.73	-0.48	0.16	-0.09	0.66	-0.24	0.71	-1.53	-0.54	0.89	0.02
VIII	-1.54	0.18	0.73	-0.68	0.17	-0.08	0.47	-0.33	0.76	-0.62	-0.38	1.18	0.01
IX	-0.70	0.50	-0.01	-0.26	-0.11	0.61	0.58	-0.52	1.02	-1.46	-0.27	1.44	0.42
X	-1.12	0.00	-0.37	0.32	0.45	0.33	0.74	-0.32	1.32	0.19	0.43	1.42	0.55
XI	-0.79	0.02	-0.50	0.73	0.53	0.24	0.48	-0.88	0.89	0.59	-0.09	1.08	0.62
XII	-1.19	-0.36	-0.71	0.62	-0.14	0.05	0.20	-1.16	0.33	0.04	-0.05	1.68	-0.09
XIII	-1.49	0.07	0.21	-0.70	-0.09	0.21	0.20	-0.42	0.77	-0.61	-0.22	0.83	-0.07

- Impactos de la sequía agrícola

Fuente: SIACON-SAGARPA, 2016. Estadísticas agrícolas. <http://www.gob.mx/siap/>

Tabla 35. Porcentaje de superficie agrícola afectada

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	14%	8%	15%	3%	12%	16%	6%	9%	5%	5%	5%	4%	11%
II	5%	1%	7%	5%	3%	1%	1%	2%	1%	7%	1%	3%	2%
III	11%	9%	7%	18%	13%	5%	5%	11%	6%	40%	6%	11%	4%
IV	6%	5%	8%	7%	5%	4%	4%	17%	5%	6%	4%	8%	5%
V	19%	12%	9%	12%	11%	6%	3%	14%	8%	8%	6%	8%	4%
VI	28%	36%	29%	24%	5%	7%	7%	3%	2%	25%	4%	3%	3%
VII	2%	3%	6%	41%	2%	17%	8%	33%	19%	53%	15%	1%	9%
VIII	9%	8%	9%	12%	13%	11%	10%	18%	12%	18%	8%	5%	5%
IX	14%	4%	10%	11%	12%	5%	7%	10%	6%	16%	9%	22%	6%
X	4%	6%	5%	11%	6%	9%	5%	5%	7%	7%	6%	5%	4%
XI	3%	2%	5%	4%	1%	1%	2%	2%	3%	3%	3%	2%	4%
XII	28%	7%	5%	14%	5%	3%	19%	10%	3%	1%	3%	1%	2%
XIII	4%	2%	1%	8%	1%	1%	0%	5%	5%	23%	4%	1%	3%

Tabla 36. Superficie siniestrada (ha)

RHA	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	3301	1881	3561	6058	2691	3581	1362	2080	1082	1152	1223	9844	2301
II	2662	5912	3285	2684	1388	5528	8164	1314	3574	4470	6431	2071	1139
III	1369	1140	9069	2427	1620	7184	7099	1482	6961	6475	6557	1329	4550
IV	6685	5857	8544	7499	5386	4474	4143	1883	5606	6679	4660	8718	5659
V	2266	1355	1174	1521	1429	8011	4581	1980	1059	1152	8044	1139	5861
VI	2770	3463	2907	2445	4923	6902	7402	3411	2747	2570	4082	2837	2952
VII	2375	3971	6795	5053	2790	2269	1079	4268	2425	5976	1882	1730	1148
VIII	1350	1188	1344	1868	1912	1651	1558	2767	1829	2826	1242	8422	8120
IX	1954	5675	1387	1549	1758	7402	1030	1436	8644	2434	1258	3098	8067
X	6154	8800	6350	1510	8168	1192	7044	7216	1060	9542	9197	7572	5442
XI	4560	3907	7490	6568	1767	1988	2147	2799	4200	4410	3846	3569	6082
XII	2150	5489	4201	1134	3685	2171	1485	7894	1895	1162	2177	8696	1451
XIII	3207	1998	1030	6891	7803	1045	4301	4084	4753	2036	3193	1022	2877

- Impactos de la sequía hídrica

Fuente: SIAP-SAGARPA, 2016. Volúmenes de almacenamiento de agua en las principales presas del país.

http://www.campomexicano.gob.mx/porta1_siap/Monitor/gas/agua/presas.pdf

Tabla 37. Anomalía del porcentaje de agua almacenada en presas representativas por RHA

RHA	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
II	3%	9%	19%	13%	22%	36%	18%	-80%	15%
III	23%	29%	2%	15%	16%	35%	9%	19%	-5%
IV	23%	39%	29%	25%	29%	0%	34%	21%	27%
VI	16%	17%	-14%	-8%	14%	38%	-10%	3%	-13%
VIII	35%	21%	1%	20%	10%	13%	10%	-5%	22%
IX	14%	4%	4%	-2%	14%	20%	-1%	24%	3%

7. ANEXO II. PUBLICACIÓN

Neri, C., and V. Magaña, 2016: *Estimation of vulnerability and risk to meteorological drought in Mexico. Weather, Climate, and Society*. 8:2, 95-110. DOI: 10.1175/WCAS-D-15-0005.1

APRIL 2016

NERI AND MAGAÑA

95

Estimation of Vulnerability and Risk to Meteorological Drought in Mexico

CAROLINA NERI AND VÍCTOR MAGAÑA

Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City, Mexico

(Manuscript received 9 January 2015, in final form 30 November 2015)

ABSTRACT

Prolonged droughts severely affect the economic, social, and environmental sectors in Mexico. The interest in reducing the costs of drought is now focused on prevention by means of vulnerability reduction. The present study proposes a methodology to estimate vulnerability and risk to drought, considering the physical, economical, and social factors that make regions of Mexico prone to experiencing hydrological and agricultural droughts. Recognizing that there is no universally accepted way to describe vulnerability, the proposed method defines the object under study, the natural hazard, and vulnerability factors by means of indicators. The vulnerability factors are related to water infrastructure, the condition of aquifers or water reservoirs, the levels of wastewater treatment, water productivity in agriculture, hydraulic infrastructure, and water tariffs. A drought vulnerability model for each Hydrological Administrative Region (RHA) in Mexico is obtained by combining the vulnerability indicators. The product of vulnerability and hazard results in risk estimates that are compared with impact data to validate the approach. Information on agricultural or hydrological drought is used as impact data. The validation process is an important step in the methodology, since it allows examination of the causes of disasters by the vulnerability factors and leads to risk management strategies. It is found that although vulnerability to meteorological drought in the agricultural and hydrological sectors in Mexico has decreased in recent years, the drought risk is still high and results in severe economic losses, such as those registered in central and northern Mexico during the 2011–12 prolonged drought.

1. Introduction

Droughts are one of the major climatic hazards around the world. Their impacts range from reductions in water supply to famine and even death. Frequently, responses to drought are oriented to optimize the use of water in households, agriculture, livestock, and industry, or to increase water storage capacity and distribution infrastructure (UNISDR 2011). Public policies have been developed to reduce the magnitude of drought impacts in countries like the United States, Australia, and South Africa (Wilhite and Rhodes 2005; Howden et al. 2014; Wilhite et al. 2014). Most of them focus on the postimpact interventions mainly by means of economic assistance to those affected by severe water deficit. There are also programs intended to reduce

vulnerability by means of prevention, using early warning systems with improved seasonal forecasts and drought risk awareness and education (Wilhite et al. 2014; Steinemann 2014). But even with recent advances in the understanding and prediction capacity of climate variability (CLIVAR 2011), risk to drought appears to be reaching critical levels more frequently (UNISDR 2013). This appears to be related to increased vulnerability rather than signals of climate change (Liverman 1990; Burton et al. 2002; ISDR 2003; IPCC 2012). Therefore, international programs like the National Drought Management Policy initiative (WMO and GWP 2014) promote the creation of public policies and strategies to face droughts based on vulnerability analysis and risk management.

Meteorological droughts in arid and semiarid regions have resulted in significant losses in the agriculture and livestock sectors. The impacts of drought may even lead to migration and abandonment of subsistence activities (Feng et al. 2010), as in central-northern Mexico (García 1993; Magaña and Neri 2012). The 1998–2002 hydrological drought, for instance, resulted in difficulties for

Corresponding author address: Carolina Neri, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Coyoacán, Distrito Federal, México.
E-mail: caro.neri@gmail.com

DOI: 10.1175/WCAS-D-15-0005.1

© 2016 American Meteorological Society

Mexico in complying with the 1944 Mexico–U.S. Water Rights Treaty (Sánchez 2006). Even short-term (seasonal) droughts associated with El Niño–Southern Oscillation have had negative consequences, mainly in rain-fed agriculture and for control of forest fires (Delgadillo et al. 1999).

During the 2011–12 prolonged drought, one of the most severe and damaging in recent decades, 86% of Mexican territory experienced a severe water crisis (SMN 2011). Reports indicate that the drought affected around 310 000 people in the agricultural and cattle ranching sectors, 800 000 agricultural hectares, and 1.3 million head of livestock (CENAPRED 2013). Economic losses exceeded \$1.2 billion (U.S. dollars) in the agriculture sector alone (Langner 2012). Additionally, insufficient municipal water supplies resulted in substantial reductions in the water provision service for more than 2000 communities, approximately 2 million people (DOF 2012). Some states were more severely affected than others, which had to do with the level of preparedness and vulnerability to drought. Most governmental actions against drought focused on providing financial assistance to those affected in the agricultural and cattle ranching sectors. The severe impacts of the recent drought event led the Mexican authorities to launch the National Program Against Drought (Programa Nacional contra la Sequía, also known as PRONACOSE; Korenfeld Federman et al. 2014). This program requires identifying effective actions aimed at managing drought risk by reducing vulnerability factors.

An adequate characterization and quantification of vulnerability may serve to reduce the hazard-oriented perspective of disaster risk management and may help to better understand the causes of disasters (Hewitt 1983; Maskrey 1993; Lavell 1996). However, there are no universally accepted methodologies to characterize and quantify vulnerability (Birkmann 2006; Eakin and Luers 2006; Cardona et al. 2012). By looking at various approaches aimed at quantifying vulnerability, one can construct a methodology based on the use of indicators that can be combined into a single index to represent the dynamical and multifactorial essence of vulnerability. The drought vulnerability index may also serve to guide the definition of measures aimed at reducing vulnerability and managing risk and, consequently, to reduce the socioeconomic and environmental costs of drought (Dessai et al. 2003; Birkmann 2006).

The main goal of the present study is to propose a methodology to evaluate vulnerability and risk to meteorological drought in a quantitative manner that can explain the spatial and temporal contrasts in the hydrological and agricultural droughts in Mexico. The paper is outlined as follows: the conceptual framework

to quantify vulnerability and risk to drought is presented in section 2. The methodology proposal is described in the section 3. The application of the methodology to determine vulnerability and risk to drought at a regional level in Mexico is presented in section 4. Conclusions are given in section 5.

2. Conceptual framework

a. Vulnerability and risk assessment

Various methodologies have been proposed to characterize and evaluate vulnerability in the disaster risk and climate change fields (Downing 1990; Cutter 1996; Turner et al. 2003; UNDP 2004; Luers 2005; Eakin and Luers 2006; Cardona et al. 2012). Most approaches are based on the description of the socioeconomic factors that make a sector vulnerable (Blaikie et al. 1994; Cutter et al. 2000; Kelly and Adger 2000). Others propose to estimate vulnerability as a function of exposure, adaptive capacity, and sensitivity (Luers et al. 2003; IPCC 2007; O'Brien et al. 2008). The United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR 2004) defines vulnerability as “the conditions determined by physical, social, economic and environmental factors or process, which increase the susceptibility of a system or community to the impact of hazards.” This is the approach we follow in the present study, since it allows for examination of a broader spectrum of vulnerability factors, which in turn can be represented as indicators and, later on, as indices (Carreño et al. 2004; Birkmann 2006; Cardona 2006; UNISDR 2009; USAID 2014).

A vulnerability assessment is adequate as long as it serves to estimate risk that, in turn, explains disasters in their spatial or temporal context. Therefore, it is necessary to analyze whether the vulnerability description serves to obtain risk assessments that compare well with recent impacts. Risk may be defined as the interaction between a potentially damaging event (hazard) and the vulnerable conditions of a society or element exposed (UNISDR 2004; Grossi and Kunreuther 2005; IPCC 2007; Cardona et al. 2008; UNISDR 2011). We consider that risk is actually the element that serves to estimate the chances of a disaster, and consequently, it may be compared with impact data. If risk and recent impact data are coherent, the vulnerability estimates (i.e., the vulnerability model) capture the contexts in which the hazard (e.g., meteorological drought) results in disasters. The validation of the risk estimates is crucial to determine if the vulnerability model modulates the magnitude of the impacts. Only a few studies validate their vulnerability models by comparing risk and impact data. The present methodological proposal considers the evaluation of risk to be a crucial step.

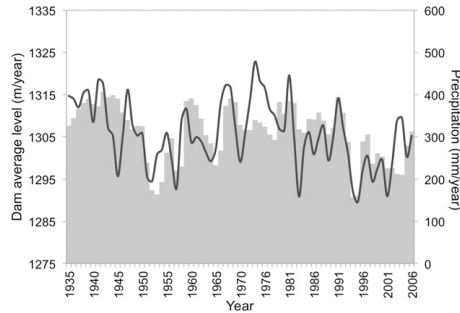


FIG. 1. Relation between annual precipitation (solid line) and dam levels (gray bars) in La Boquilla, Chihuahua.

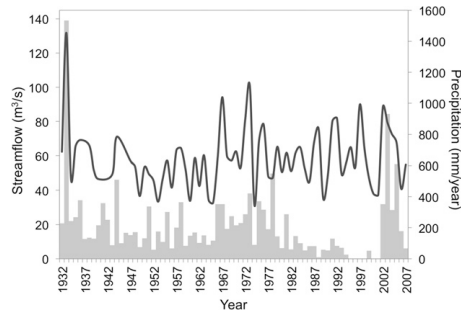


FIG. 2. Relation between annual precipitation (solid line) and streamflow (gray bars) in the San Fernando River, Tamaulipas.

b. The concepts of hazard and hazard event (meteorological droughts)

Weather and climate events outside of their normal range of variability are natural hazards whose magnitude or frequency may result in disasters in vulnerable regions. Meteorological or climatic hazards are usually given in terms of probability, calculated from historical data. Hazard probability changes with climate change; for instance, extreme weather phenomena have become more frequent in recent decades (Aguilar et al. 2005). However, it is not clear if this is the case for meteorological drought (Méndez and Magaña 2010; Sheffield et al. 2012). The chances of a meteorological drought (i.e., the hazard) as a recurrent condition that results in agricultural or hydrological droughts (i.e., the impacts) may be characterized in terms of probabilities. Hazard (probability) times the vulnerability (index) results in risk (probability of a disaster). In the present case, disaster corresponds to a hydrological or an agricultural drought. Risk among regions may be compared to determine if higher (lower) risk matches the observation of higher (lower) frequencies of disasters.

On the other hand, historical events of drought are actual manifestations of a hazard. They had a magnitude and duration that was measured as a precipitation deficit for particular years. When the magnitude or duration of a drought is described for a specific time, it is an actual manifestation of the hazard, and it can be called a hazard event. When vulnerability and hazard event information are combined, risk is given as an actual (deterministic) value that should be proportional to the impact. The use of a hazard event concept allows evaluation of risk to be compared with actual information about impacts and examined to see if there is coherence between the two signals. A similar type of drought in two different time periods may have different impacts depending on the

vulnerability context, which modulates the magnitude of the impact. We will refer to the actual manifestations or specific events of drought (on a yearly basis for instance) as a hazard event.

c. Hydrological and agricultural droughts

Hydrological or agricultural droughts correspond to the impacts of a meteorological drought in a context of vulnerability. Their magnitudes may be the result of a severe precipitation deficit or large vulnerability conditions. For example, at La Boquilla Dam in Chihuahua in northern Mexico, water levels vary, slightly lagging annual precipitation (Fig. 1). Years with negative (positive) precipitation anomalies in the region result in low (high) dam levels in the following season or year. In this case, meteorological droughts are the main driver of hydrological droughts as in the 1950s or 1990s. However, hydrological droughts may also be the result of a high vulnerability context, particularly related to inadequate water management practices (Ortega-Gaucin 2012). In the San Fernando River in Tamaulipas in northeastern Mexico, hydrological droughts—determined, for instance, by low streamflow—may occur even when precipitation remains within its normal range of variability, as in the late 1980s (Fig. 2). Here, vulnerability related to inadequate water management practices is the key element in explaining hydrological droughts.

3. Proposed methodology to quantify vulnerability and risk

To examine the risk of hydrological or agricultural droughts in Mexico, a methodological framework to quantify vulnerability is proposed. It includes a characterization of the elements of the study, the quantification of the vulnerability factors, the development of risk

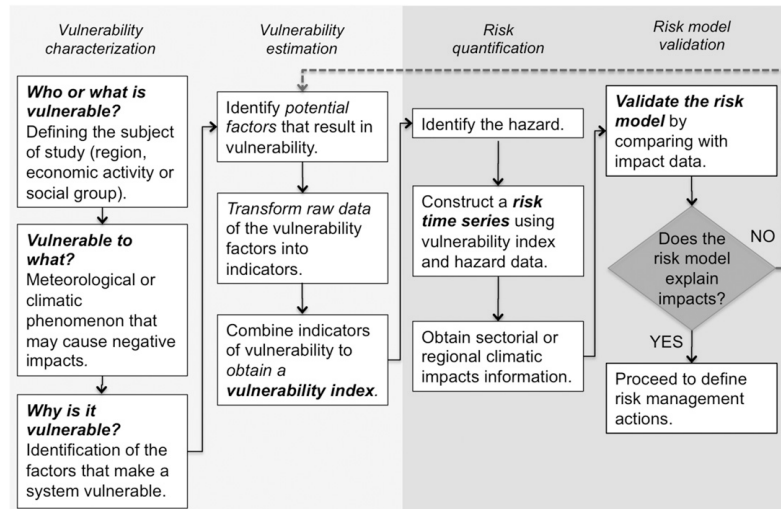


FIG. 3. Flow chart of a four-phases methodology to estimate vulnerability and risk to drought.

estimates (model), and a validation of the risk model (Fig. 3).

a. First phase: Vulnerability characterization

In the first phase, it is necessary to define what is vulnerable. It may be a region, a social group, or a socioeconomic sector. In each case, one should have in mind what aspect of the object under study may be affected by the hazard. This is related to recent impact measures used as reference. Therefore, it is necessary to determine the natural phenomenon defined as the hazard and characterize it. The characterization depends on the probability of occurrence (hazard) or its magnitude, or its occurrence in specific times (hazard event) that leads to impacts at a particular time in recent years. For instance, drought as a hazard may correspond to the chances of net precipitation less than 140 mm yr^{-1} in the Baja peninsula (around 25% in the 1900–2010 period). This threshold of precipitation is estimated as the minimum required for having enough water for various sectors in the region. The hazard event corresponds to the times in recent years when this condition ($<140 \text{ mm yr}^{-1}$ of precipitation) has been met.

In the latter part of this phase, it is necessary to determine some of the main factors that make the object under study vulnerable. They correspond to physical, social, or economic conditions that show high- and low-frequency variations and vary from one region to another. This implies that in the risk management

process, a measure aimed at reducing a vulnerable factor with dominant low-frequency variations may take time to show, but it may be more robust than targeting a factor with high-frequency variations (i.e., that is “flexible”) since it may easily change from one year to another.

b. Second phase: Vulnerability estimation

The second phase of the process characterizes vulnerability factors by means of data or indicators. The Organization for Economic Cooperation and Development (OECD 2003) defines an indicator as a “parameter, or a value derived from parameters, which points to, provides information about, describes the state of a phenomenon/environment/area, with a significance extending beyond that directly associated with a parameter value.” The combination of various indicators represents the multifactorial characteristic of vulnerability. There are no generally agreed upon rules for the construction of vulnerability indicators (Tate 2012). Thus, a vulnerability index may simply be the result of averaging indicators. It is advisable to select clear, robust, representative, and easily understandable indicators to make them meaningful to public policy makers (Carreño et al. 2007; OECD 2008; USAID 2014). Indicators may describe aspects of the population (e.g., population density), economy (e.g., poverty levels), or physical conditions (e.g., land use changes). It is advisable that indicators, constructed from data,

express a condition of the object of study for a period to observe how they change in time.

Once the indicators are identified, they are normalized so they can be compared with each other and aggregated into an empirical–quantitative expression of vulnerability. The normalized indicators for each region (V_r) are constructed with the following equation:

$$V_r(t) = \frac{\alpha_i(t) - \min(\alpha)}{\max(\alpha) - \min(\alpha)}, \quad (1)$$

where $\alpha_i(t)$ is a vulnerability factor (indicator), as a function of time t , and $\max(\alpha)$ and $\min(\alpha)$ are its maximum and minimum values. Therefore, $0 \leq V_r \leq 1$ where the lowest (highest) vulnerability values are 0 (1). A weighted average of normalized vulnerability indicators results in an average or compound vulnerability index (\overline{VI}):

$$\overline{VI}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i V_{r_i}(t)}{n}, \quad (2)$$

where n is the number of indicators and w_i is the weighting factor that represents the importance of vulnerability factor i in the average or compound vulnerability index. The weights for every indicator may be adjusted until an adequate fit between risk and impact data is reached. For instance, a hydrological drought may require giving more weight to the condition of the aquifers and pollution levels than those factors related to agricultural drought.

c. Third phase: Risk quantification

The third phase corresponds to risk determination by combining vulnerability and hazard information. This relationship is described as

$$\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{Vulnerability}.$$

If hazard (probability) information is used, a risk value (probability) for the entire period of time and a given region or sector is obtained. Risk estimates between regions may be compared to determine if the higher risk regions or sectors correspond to regions where disasters are more frequent or with higher magnitude.

d. Fourth phase: Risk model validation

The fourth phase corresponds to the comparison of risk and impact data. Risk estimates obtained with event hazard information may be compared with time series of impact activity or magnitude to determine if vulnerability actually modulates impacts (frequency or magnitude). This is an indirect form of validating vulnerability

assessments, since vulnerability is not a directly observable phenomenon (Tate 2012). If risk and impact data for a particular region show coherency over time, the vulnerability estimate may be considered adequate. In a particular place, similar hazards may have different impacts depending on the level of vulnerability at that specific moment.

If the risk model describes the recent impacts or disaster activity, one may use it, for instance, in combination with a seasonal climate forecast to estimate the potential impacts of a climate event in the near future. However, if the risk model does not even approximately describe impact or disaster activity, or risk contrasts among regions, the vulnerability factors should be reviewed and a new vulnerability index (model) constructed.

A critical level of risk may be estimated by determining past situations when a disaster occurred. The determination of the critical risk level may serve for a number of purposes: it can be used in early warning systems, as a guide for the need of structural vulnerability reduction measures, or a guide to the amount of adaptation needed for climate change.

4. Risk and vulnerability to meteorological drought in Mexico

a. First phase: Vulnerability characterization

Meteorological droughts (hazard) may be described in terms of negative values of the so-called standardized precipitation index (SPI; McKee et al. 1993; Keyantash and Dracup 2002). Méndez and Magaña (2010) have found that prolonged meteorological droughts extend to spatial scales of thousands of square kilometers and are adequately represented with SPI-12. The Hydrological Administrative Regions (RHAs) of Mexico (Fig. 4) approximately correspond to large basins. For each RHA, a group of water stakeholders defines water management policies. The Climate Assessment for the Southwest (CLIMAS) group has worked with some of these stakeholders on binational water activities (Wilder et al. 2010). There are subdivisions of the RHAs into subbasins, but information to document the impacts of drought or the vulnerability factors is not always available at these finer scales.

Several factors make RHAs vulnerable to meteorological drought (e.g., Breña 2004; Jiménez Cisneros et al. 2010), including increasing demands for water that frequently exceed water availability; overexploited aquifers and salinity intrusion in coastal aquifers; low wastewater treatment levels; low water prices relative to its actual economic value; low agricultural water productivity; and insufficient, obsolete, or inoperative water

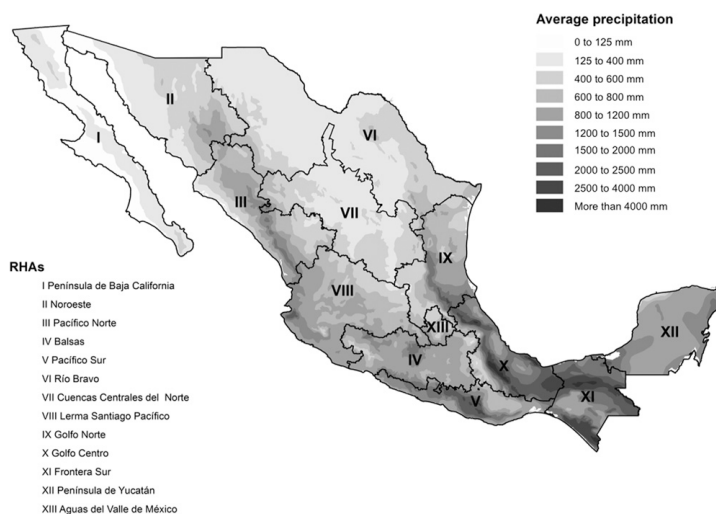


FIG. 4. Hydrological-Administrative Regions (RHAs) in Mexico.

infrastructure. Various water managers in the RHAs consider these factors as the important ones that make regions vulnerable to drought. Data representing these factors for a selected period of time were obtained from official sources, such as the Mexican Water Agency (CONAGUA), for the 2002–12 period. The drought vulnerability indicators are defined as follows.

1) PRESSURE ON WATER RESOURCES (PW)

The PW indicator shows the water consumed with respect to water availability. The economic and demographic growth in recent decades has increased the demands for water. The available water is used for agricultural activities (76.6%), for the urban water supply (14.5%), for industry (4%), and for hydro-power generation (4.9%; CONAGUA 2013). In recent years government actions have been aimed at reducing water supply and water demands. However, during periods of drought, water deficits are exacerbated, and the lack of appropriate policies frequently results in crisis in the agricultural and hydrological sectors.

2) CONDITION OF AQUIFERS (CA)

Aquifer overexploitation is one of the major problems in several regions of Mexico. According to CONAGUA (2013), 106 of 653 aquifers are over-exploited. In coastal regions, seawater intrusion in aquifers is becoming a problem, mainly because of sea

level rise (Moreno Vázquez et al. 2010). The recovery of an overexploited aquifer may take several years or even decades.

3) WASTEWATER TREATMENT (WT)

According to CONAGUA (2013), 47.5% of water used in the cities during 2012 was treated. This is relatively low compared to wastewater treatment levels in developed countries; in Canada this value is around 87%, in Denmark it is 90%, and in Germany it is 97% (OECD 2013). This water is not necessarily potable, but it may be used for irrigation.

4) WATER TARIFFS IN URBAN AREAS (WTU)

Only 76% of water in urban areas is charged, at an average cost of \$0.30 per m³ (Sandoval Minero 2010). The total revenue for the water services is insufficient to maintain a high level of efficiency in the sector; consequently, the federal government finances most urban water services and projects (Pineda Pablos 2011). At the city level, water leakage is a common problem because of limited financial capacity. The WTU indicator makes reference to the financial deficit in the RHAs, considering that the average international price of water in urban areas is around \$2.5 per m³ (OECD 2009). In Mexican metropolitan areas, the cost of water varies from around \$0.14 to \$2 per m³ (CONAGUA 2013).

TABLE 1. Factors that result in vulnerability to drought.

Vulnerability factor	Concept	Indicator
1. Level of pressure on water resources (PW)	Proportion of water withdrawals for consumptive use with respect to renewable water	$PW = \text{total volume of water used} / \text{renewable water}$
2. Condition of aquifers (CA)	Percentage of overexploited aquifers or with seawater intrusion problems	$CA = \text{number of overexploited aquifers or intruded seawater problems} / \text{total number of aquifers}$
3. Level of wastewater treatment (WT)	Proportion of municipal waste water treated	$WT = 1 - (\text{water treatment volume} / \text{urban water supply volume})$
4. Water tariff in urban areas (WTU)	Water tariff in cities compared with a reference price of \$2.5 per m ³	$WTU = 1 - [\text{water tariff in cities} / (\$2.5 \text{ per m}^3)]$
5. Water productivity in irrigation districts (WP)	Cost of the water allocated (\$ per m ³) in terms of the total agriculture production (tons)	$WP = \text{average rural price} / (\text{total water allocated} / \text{total agriculture productivity})$
6. Water storage (WS) capacity in major reservoirs	Proportion of water storage capacity with respect to water actually stored	$WS = \text{Volume stored in reservoirs} (1) / \text{total volume surface water consumptive} (2)$ $(1) = (\% \text{ annual volume stored} \times \text{maximum water storage capacity}) / 100\%$ $(2) = \text{Total volume consumptive} \times \% \text{ surface water source}$

5) WATER PRODUCTIVITY IN IRRIGATION DISTRICTS (WP)

Irrigated agriculture is the largest water user. The efficiency in irrigation districts has been around 37% (Arreguín et al. 2011). However, WP is increasing in recent years thanks to the introduction of new irrigation technologies (Palerm Viqueira et al. 2010). The situation for the (rain-fed and irrigation) agricultural sector becomes critical under prolonged meteorological droughts. Rising water productivity in agriculture, instead of allowing overpumping, constitutes one of the major challenges to guarantee food security and reduce pressure on water resources at a low environmental cost (Rijsberman 2006; FAO 2013).

6) INFRASTRUCTURE AND WATER STORAGE (WS)

The 2011–12 drought in northern Mexico showed that regions with adequate water levels in dams and reservoirs managed to mitigate the impacts of precipitation deficit. Since the 1940s, the development of hydraulic infrastructure has increased. The volume of water stored annually in 172 major dams corresponds to almost 80% of the total water storage capacity of the country, which is around 150 hm³ (CONAGUA 2013). The WS indicator is calculated only for RHAs where large dams exist and takes into account the annual mean water level in the dam, since there may be several half empty dams that make a region vulnerable to meteorological drought.

In summary, six drought vulnerability factors have been considered (Table 1), represented by indicators

constructed from data of CONAGUA for the 2002–12 period. Indicators for each RHA have been normalized and their temporal behavior analyzed.

b. Second phase: Vulnerability estimation

The vulnerability to drought factors continuously changes, which is apparent in the fluctuations and trends of each indicator (Fig. 5). The higher the value of the indicator, the more vulnerable an RHA is because of this factor. Regions where pressure on water resources is high usually correspond to arid regions, as in the northern part of Mexico or in regions where demands are high, as in the Mexico City region. The pressure on water resources vulnerability indicator has been increasing mainly because of higher water consumption and population increases. In some cases, the pressure on water resources remains almost constant in spite of increased demands, thanks to creation of water programs (Fig. 5a).

Most RHAs are moderately vulnerable to drought based on the condition of their aquifers. However, in several parts of northern and central Mexico, aquifers are critically overexploited and polluted. This indicator may be considered “rigid” since it takes several years for an aquifer to recover. Public policies to reduce aquifer overexploitation have been put forward but are still insufficient. Aquifer overpumping increases during drought periods, as during 2010–12 in northern Mexico (Fig. 5b).

The water deficit for irrigation may be relieved by the use of treated water (Hamdy 1992). This is not a

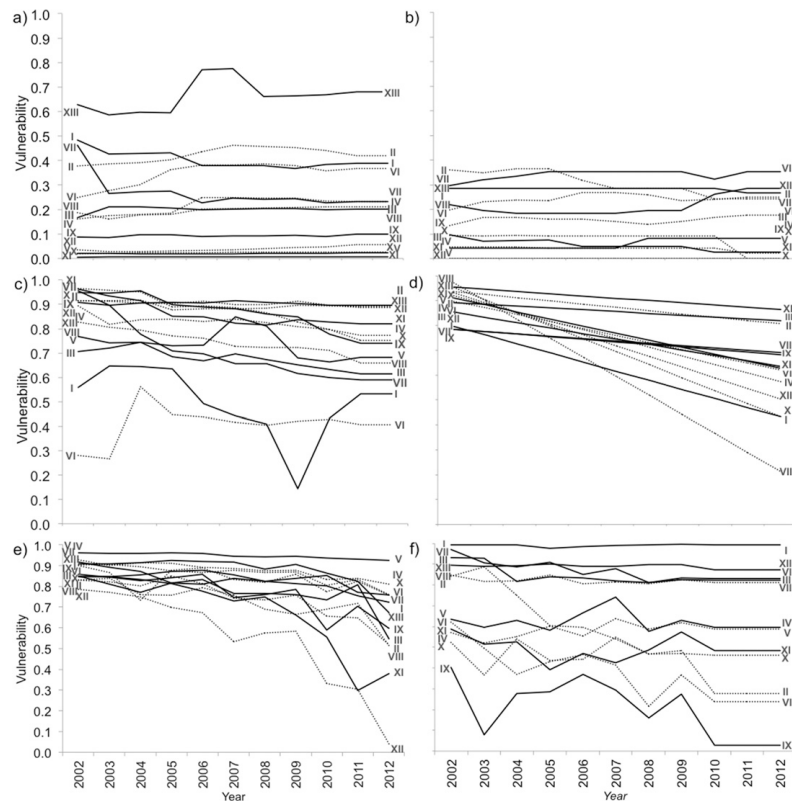


FIG. 5. Dynamic vulnerability indicators for RHAs from 2002 to 2012: (a) PW resources, (b) CA, (c) WT, (d) WTU areas, (e) WP in irrigation districts, and (f) WS capacity in major reservoirs.

common practice in Mexico, as the wastewater treatment indicator shows high levels of vulnerability for most of the RHAs. The percentage of wastewater treatment and reuse is less than 20% on average. However, most regions show a slow but constant improvement (vulnerability reduction) in terms of wastewater treatment. For instance, RHA I has invested in wastewater treatment plants since the beginning of the twenty-first century, and it shows a corresponding reduction in the wastewater treatment vulnerability indicator (Fig. 5c). This indicator may also show negative changes when water treatment plans are out of order for long periods of time.

The water tariffs in the urban areas indicator relates to the financial efficiency in the RHAs. Higher water tariffs in urban areas values lead to more consciousness by

citizens of the actual cost of potable water or to additional resources to maintain water infrastructure. Insufficient revenue leads to inefficiencies in the water system and reduces the financial capacity to respond to crises during meteorological droughts (Fig. 5d).

Similar to most of the world, water in Mexico is used mainly for agricultural purposes. The efficiency in irrigation practices varies from place to place, depending on the technologies available, the type of crop, standard practices, etc. (FAO 2003). Most of the RHAs have improved water productivity by establishing regulations for groundwater extraction and by using pressurized irrigation systems in large areas. However, this has not necessarily resulted in water consumption reductions since data indicate water demands in the sector remain the same or even increase. This becomes a serious

problem during drought periods as low levels in dams are compensated for by increased overpumping from aquifers. The water productivity in irrigation districts provides a measure of the efficiency of water use in the agricultural sector (Fig. 5e). In the northern part of Mexico water productivity is high, but the real cost of crop production is high as well, given the energy subsidies for water pumping (Quadri de la Torre 2011).

During the second half of the twentieth century, numerous dams were built in Mexico, mostly for irrigation projects (Aboites 2009). However, the dependency of this sector on this source of water makes it highly vulnerable to prolonged droughts. Below-average dam levels may lead to crises in agricultural and cattle-ranching activities. Therefore, it is not only the existence of water reservoirs or infrastructure that reduces vulnerability to drought, but also adequate management practices. The water storage capacity in the major reservoirs indicator refers to the ratio of the mean annual volume of water stored (with respect to maximum water storage capacity) and the amount of water consumed in the RHAs. Regions with the highest water storage capacity in major reservoirs vulnerability are RHA I, RHA III, RHA VII, RHA VIII, and RHA XIII (Fig. 5f). In the Baja California region, dams have not been a solution to water scarcity since precipitation is so low that the infrastructure, such as the Abelardo L. Rodríguez Dam in the Tijuana River, fills up approximately once every decade, typically during an intense El Niño winter (Magaña 1999). In the Mexico City metropolitan area, almost 30% of water is supplied by the Cutzamala system of water reservoirs. When the Cutzamala levels are below normal, even a minor precipitation deficit may result in a hydrological drought in the Mexico City metropolitan area.

There are certainly other vulnerability factors that may contribute to explaining drought impacts in Mexico, including poverty, which may limit access to water in the agricultural sector during drought periods. For the time being, the six previously defined factors are combined into a single vulnerability index with an equally weighted average (Fig. 6). However, it is possible to use different weights for each indicator, depending on what may be the most important water use, the sector under consideration, or the impact. The time evolution of the vulnerability index can be interpreted as the context in which precipitation deficit (meteorological drought) may occur and result in a hydrological and agricultural drought (impact).

In general, drought vulnerability is decreasing, but in some RHAs it is still high, as in northern Mexico (e.g., RHA VII) or in the Mexico City metropolitan area (RHA XIII), which may be the region most vulnerable

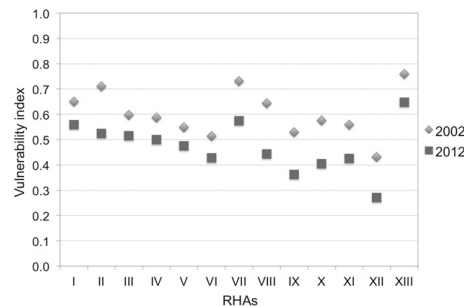


FIG. 6. Drought vulnerability index for each of the 13 RHAs in 2002 and in 2012.

to drought in the entire country ($\bar{VI} = 0.76$). However, it is risk that matters when estimating the impacts of drought. The adequacy of the vulnerability estimate in combination with hazard information should be evaluated to compare the risk values with agricultural or hydrological drought information.

c. Third phase: Risk quantification

Some indices of drought severity, such as the North American Drought Monitor, refer to negative anomalies of precipitation and to the potential impacts in regions or sectors. But at least for Mexico, they appear to estimate the risk of agricultural or hydrological drought without an actual quantification of vulnerability. To characterize the critical magnitude of a drought (or event hazard), it is necessary to estimate the amount of precipitation that would result in insufficient water for human activities and environmental requirements. Meteorological drought information, such as the SPI-12, only gives an idea of the magnitude of the precipitation deficit that could cause agricultural or hydrological droughts, but in some highly vulnerable regions, a slight reduction in precipitation (e.g., $0 > \text{SPI-12} > -1$) may result in hydrological or agricultural droughts.

When risk is evaluated using the hazard (probabilities of negative precipitation anomalies), the corresponding water deficit should be estimated. For example, RHA I has an average annual rainfall of around 165 mm. Considering the entire area of RHA I and that a high percentage of precipitation evaporates, this amount of rain results in an average water availability of approximately $4625 \text{ hm}^3 \text{ yr}^{-1}$. Since the water concession volume (to 2010) is 3733 hm^3 , a rain reduction of 19% or more would reduce water availability to a critical level. Thus, an accumulated annual rainfall of 133 mm or less is considered the critical level of drought or the event hazard that results in hydrological and/or agricultural droughts. The

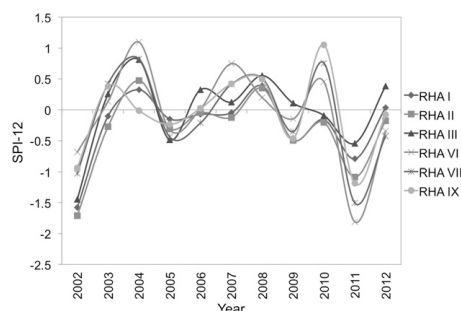


Fig. 7. Standardized Precipitation Index (SPI-12) in the RHAs of northern Mexico.

probability that this condition occurs (the hazard) is about 36%, (approximately $\text{SPI-12} < -1$). In RHA I, drought risk = hazard \times vulnerability = $36\% \times 0.55 = 19.8\%$.

Drought indices are important and useful elements for monitoring and assessing since they simplify complex interrelationships between many climate and climate-related parameters (Tsakiris et al. 2009). The negative SPI-12 provides information of the intensity of droughts in terms of standard deviations of the negative precipitation anomalies. If a SPI-12 of less than -1 is considered a threshold for intense meteorological droughts, then there were two prolonged drought periods in northern Mexico during for the period of analysis: around 2002 and around 2011 (Fig. 7). SPI-12 data were obtained from the Data Library of the International Research Institute for Climate and Society (IRI).

A drought risk index obtained by multiplying an annual value of SPI-12 for each RHA times its annual vulnerability for the 2002–12 period may be compared between regions or with impact information for the entire period of analysis. Risk values are in the range between 0 and 1, with 1 corresponding to intense drought and vulnerability to drought conditions.

d. Fourth phase: Risk model validation

There are at least two methods to validate the vulnerability estimates (model):

- (i) Comparing risk levels between regions with an equivalent hazard. If, for the same magnitude of hazard, two regions with different vulnerabilities exhibit a proportional level of impact, then vulnerability estimates may be considered adequate. For instance, regions in northern Mexico may all experience an intense drought (e.g., $\text{SPI-12} = -2$), but hydrological or agricultural droughts may be different if their vulnerabilities are different.

- (ii) Examining the temporal behavior of risk and impacts. If a region experiences similar meteorological droughts in different periods of time under changing vulnerability conditions, the risk and negative impacts should reflect this change. For instance, some RHAs of northern Mexico experienced similar meteorological droughts in 2002 and in 2011, but the magnitude of the hydrological and agricultural droughts varied since vulnerability to drought changed between these periods.

Information on hydrological droughts is available in the Mexican surface water database known as BANDAS (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales), obtained from the Mexican Institute for Water Technology (IMTA-CONAGUA). Hydrological droughts may also be described in terms of water storage levels in dams. On the other hand, the agricultural sector in Mexico issues seasonal reports at the state level on productivity (tons of production per hectare) and on the percentage of area affected by natural phenomena for the most important crops. Negative impacts in agriculture may occur from meteorological (e.g., hail storms, freezing temperatures) or climatic hazards such as drought. Agricultural drought is documented with data from the Agricultural Data Archives [Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON)] of the Ministry of Agriculture, Livestock, Rural Development, Fisheries and Food (SAGARPA).

The high-frequency variations of risk are usually related to interannual climate variability, while its low-frequency component corresponds to vulnerability. In general, hydrological or agricultural drought activity is related to the hazard, while the magnitude of the impact is related to the vulnerability level. In 11 of the 13 regions, the percentage of area affected by drought in rain-fed or irrigated agriculture compares well with risk levels (positive correlation). For instance, when one considers the impact of similar droughts in the RHAs, as Río Bravo (RHA VI) and Cuencas Centrales del Norte (RHA VII), the risk to drought and the percentage of area affected by drought are larger in RHA VII than in RHA VI (validating the first criterion) since vulnerability and risk to drought are smaller in the former (Fig. 8). Vulnerability in RHA VI is lower since its water storage capacity (WS) and water productivity in irrigation districts (WP) are larger than in RHA VII.

In the Yucatán peninsula (RHA XII), the magnitude of agricultural drought shows a negative trend (validating the second criterion) in relation to decreasing vulnerability (Fig. 9). Here, the agricultural sector has managed water resources more efficiently even under

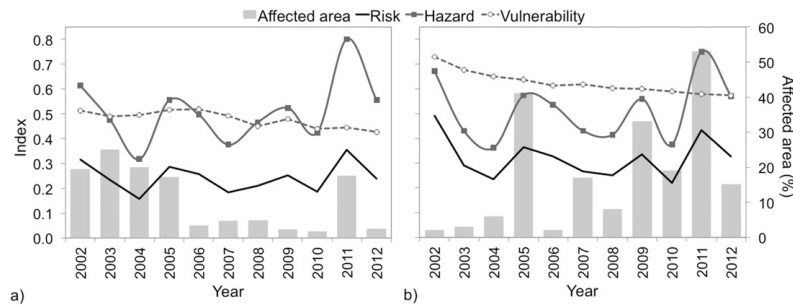


FIG. 8. Drought hazard, vulnerability, risk index, and percentage of agricultural area affected in (a) RHA VI Río Bravo and (b) RHA VII Cuencas Centrales del Norte between 2002 and 2012. Note that areas affected in 2004 were related to a flood in RHA VI.

drought conditions, as in 2009, mainly through improved water productivity in irrigation districts (WP). A meteorological drought in 2008 had smaller negative impacts than a similar drought in 2002 because of the reduced drought vulnerability. In 2005 and in 2008 there were also losses in the agricultural sector of this region, but they were related to other meteorological phenomena (intense winds and precipitation). Figure A1 in the appendix shows the results of all other RHAs.

Hydrological droughts are related to reductions in dam water level (Fig. 10). Data on water storage in October correspond to maximum values of water storage after the summer rainy season. They serve to estimate the impact of a meteorological drought in four of the six regions (negative correlation). For instance, in RHA VI Río Bravo and RHA IX Golfo Norte, drought risk was high in 2005, 2009, and 2011, which resulted in negative water storage anomalies (Fig. 10). Risk of hydrological drought was particularly high in northern Mexico (RHA VI) during 2011 given the severe prolonged drought. But in RHA IX, the Gulf of Mexico states, the risk was lower since the vulnerability is less than in RHA VI. This resulted in weak or no hydrological droughts in RHA IX even during recent drought periods, as in 2009 or 2011. Figure A2 in the appendix shows the results of all other RHAs.

Drought risk estimates from six vulnerability indicators in conjunction with meteorological drought information characterized by SPI-12 show a correspondence with impacts for hydrological and agricultural drought over 76% of the regions in Mexico for the 2002–12 period. There are some discrepancies between the RHA VIII and RHA X regions that may be explained by insufficient vulnerability indicators, by the averaging method used to construct the vulnerability index, and at

times because of insufficient impact data. In any event, vulnerability acts as a low-frequency modulator of the magnitude of the impact.

5. Conclusions

Quantifying vulnerability to drought at the RHA level using the proposed methodology has proved to be useful in explaining the spatial and temporal contrasts for hydrological and agricultural droughts in northern Mexico in recent years, that is, the semiarid regions, where water deficit is a constant problem. In most regions in southern Mexico, the evaluation of the risk model was complicated since the water management conditions are contrasting to those in northern Mexico in the hydrological and agricultural sectors. Therefore, the proposed vulnerability indicators work better for central and northern Mexico.

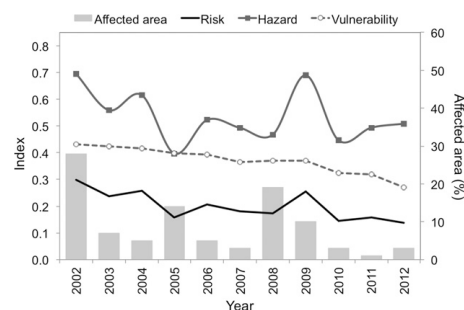


FIG. 9. As in Fig. 8, but for RHA XII Frontera Sur. Data correspond to Yucatan state. Note that in 2005 areas were affected by Hurricane Emily, and in 2008 areas were affected by strong winds from tropical wave No. 8.

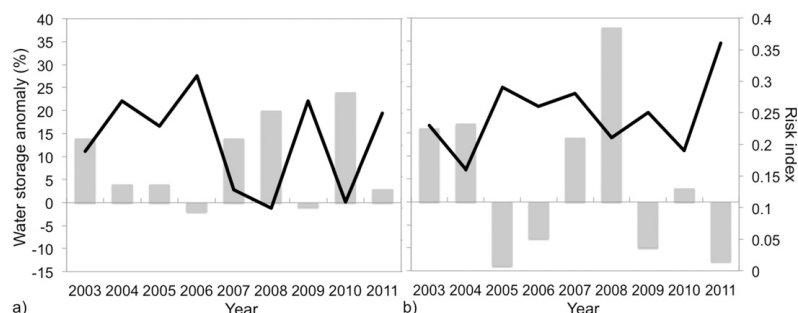


FIG. 10. Risk of hydrological drought (solid line) and water storage levels in dams in October (bars), used as a measure of hydrological drought impacts for (a) RHA IX Golfo Norte and (b) RHA VI Río Bravo between 2003 and 2011.

A risk analysis approach to identify solutions for dealing with meteorological drought should be based on an adequate identification of the vulnerability factors. The use of seasonal climate forecasts and drought outlooks may help to define contingent actions to reduce the risk of drought and its negative impacts. The analysis of drought risk should also be useful in defining structural measures to reduce vulnerability. The identification of vulnerability factors may help to identify adaptation to climate change measures, mainly to meteorological drought.

The proposed methodology tests vulnerability factors by comparing risk estimates with impact data. This methodology focuses on meteorological drought; however, it can be applied to other natural hazards. It is found that vulnerability tends to modulate the low-frequency component of risk and disaster activity. The hazard generally corresponds to high-frequency component since it is related to interannual (or higher frequency) climate variability.

The use of hazard information in the risk assessment may serve to define structural measures against meteorological drought. On the other hand, the use of hazard value in the risk evaluation may serve to implement nonstructural risk management measures such as drought early warning systems, for instance. This approach could also prove to be useful for estimating the impacts of drought in Mexico and can serve as a guide for drought monitoring efforts, such as those in the North American Drought Monitor.

A comparison of drought risk between regions and the analysis of how vulnerability has evolved in each one of them in recent decades may serve to influence public policies in Mexico aimed at preparing for prolonged meteorological droughts, changing the tradition of responding to the disaster rather than preventing it. A more proactive practice for risk management could be

to change from climate forecasts only (e.g., Lyon et al. 2012; Quan et al. 2012) to risk scenarios that include mitigation actions.

The analysis of drought at the RHA spatial scale is useful since it combines the hydrologic basin structure and the administrative decision level for planning and public policy definition. The RHA is the spatial level at which CONAGUA intends to implement the PRONACOSE program to reduce the impacts of drought. The vulnerability index and consequently the risk model may be further adjusted and refined to make them more adequate at finer spatial scales if necessary.

Finally, communicating risk to stakeholders is an additional challenge to implement a disaster risk management scheme (Steinemann 2014). Some initiatives, such as the NOAA-funded Regional Integrated Sciences and Assessment (RISA) CLIMAS program in Arizona, have established a significant collaboration with stakeholders in northern Mexico, which may assist the PRONACOSE efforts. Better ways of communicating risk are necessary to transform risk management proposals into actions. Exploring new avenues to better understand and communicate the potential impacts of drought should also be considered as an adaptation to climate change in arid regions (Meadow et al. 2013). The construction of drought impact scenarios following a methodology such as the one presented here could also be implemented around the world if creative ways of representing the vulnerability factors are found. As some studies show, it would be more significant if participatory consultation and expert opinion become part of the process of defining actions (Brooks et al. 2005). This requires clarity of the risk associated with drought.

Acknowledgments. This work was conducted with the support of the projects CONACYT-SEMARNAT-

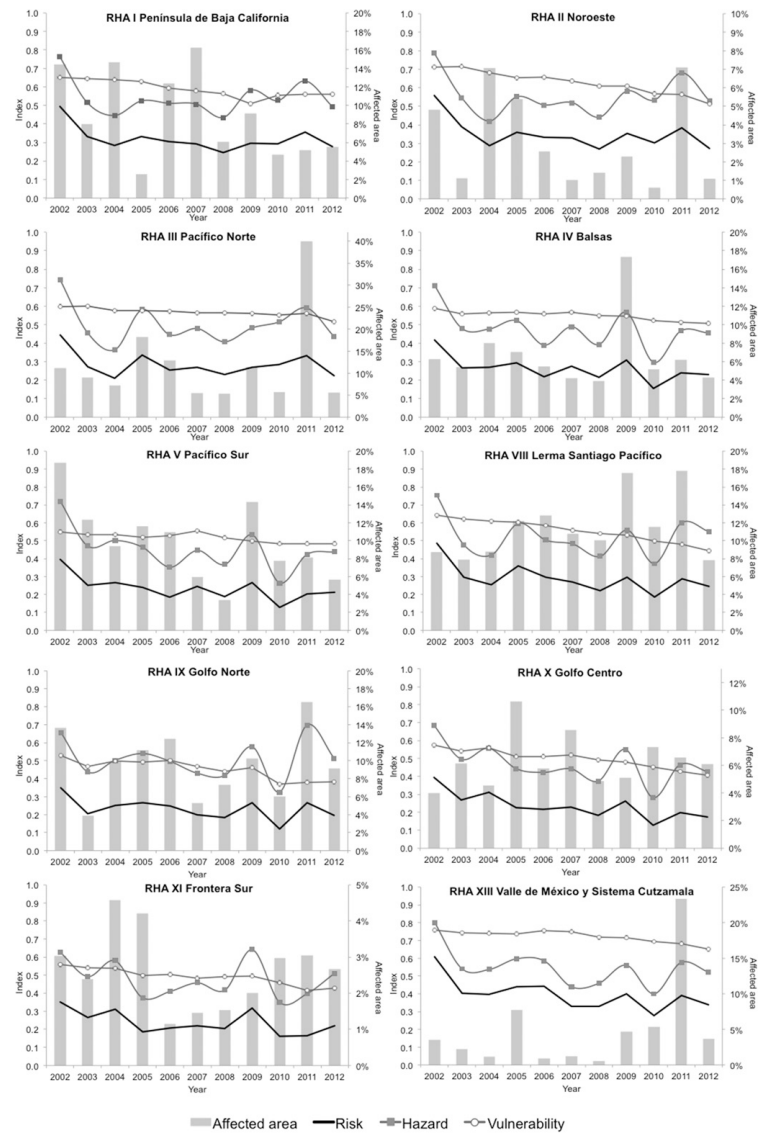


FIG. A1. Drought hazard, vulnerability, risk index, and percentage of agricultural area affected in RHAs between 2002 and 2012.

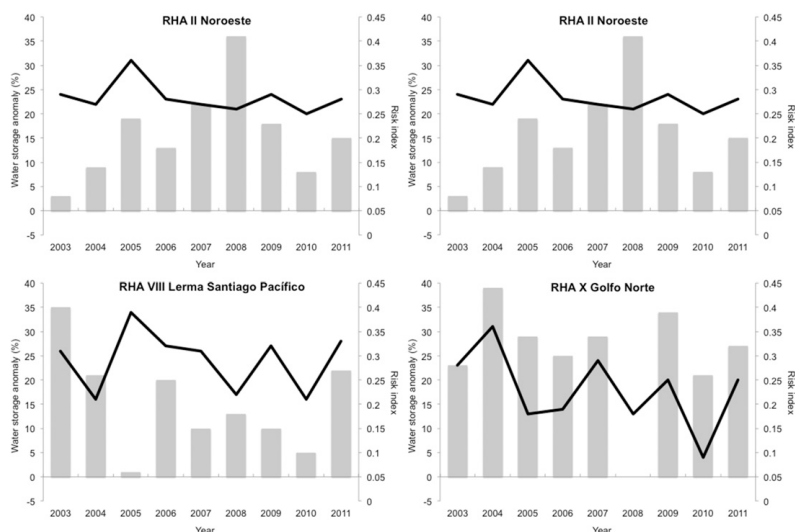


FIG. A2. Risk of hydrological drought (solid line) and water storage levels in dams in October (bars), used as a measure of hydrological drought impacts for RHAs where data was available between 2003 and 2011.

2008-1-107997, CONACYT-INEGI-209932, and UNAM-PAPIIT IN106815. C. Neri is recipient of the CONACYT Ph.D. fellowship. We are grateful to Bradfield Lyon (IRI) for his valuable comments and suggestions. We thank Mario López (CONAGUA) for the opportunity to present these results in the context of the PRONACOSE. We also thank Gustavo Vázquez (IGG-UNAM) for his technical support.

APPENDIX

Risk Model Validation in Other Regions

Figure A1 shows the analysis of the risk index validation in agriculture drought for all regions following the representative examples shown in Fig. 8. The results in hydrological drought for additional regions are presented in Fig. A2 following the same approach as in Fig. 10.

REFERENCES

- Aboites, L., 2009: *La Decadencia del Agua de la Nación: Estudio sobre Desigualdad Social y Cambio Político en México, Segunda Mitad del Siglo XX*. El Colegio de México, 145 pp.
- Aguilar, E., and Coauthors, 2005: Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003. *J. Geophys. Res.*, **110**, D23107, doi:10.1029/2005JD006119.
- Arreguín, F., M. López, and H. Marengo, 2011: Mexico's water challenges for the 21st century. *Water Resources in Mexico: Scarcity, Degradation, Stress, Conflicts, Management, and Policy*, U. Oswald, Ed., Springer, 21–39.
- Birkmann, J., 2006: Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: conceptual frameworks and definitions. *Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies*, J. Birkmann, Ed., United Nations University Press, 9–54.
- Blaikie, P., T. Cannon, I. Davis, and B. Wisner, 1994: *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*. Routledge, 284 pp.
- Breña, A. F., 2004: *Precipitación y Recursos Hidráulicos en México*. Universidad Autónoma Metropolitana, 319 pp.
- Brooks, N., W. N. Adger, and M. Kelly, 2005: The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. *Global Environ. Change*, **15**, 151–163, doi:10.1016/j.gloenvcha.2004.12.006.
- Burton, I., S. Huq, B. Lim, O. Pilifosova, and E. L. Schipper, 2002: From impacts assessment to adaptation priorities: The shaping of adaptation policy. *Climate Policy*, **2**, 145–159, doi:10.3763/cpol.2002.0217.
- Cardona, O. D., 2006: A system of indicators for disaster risk management in the Americas. *Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies*, J. Birkmann, Ed., United Nations University Press, 189–209.
- , M. G. Ordaz, L. E. Yamín, M. C. Marulanda, and A. H. Barbat, 2008: Earthquake loss assessment for integrated disaster risk management. *J. Earthquake Eng.*, **12**, 48–59, doi:10.1080/13632460802013495.

- , and Coauthors, 2012: Determinants of risk: Exposure and vulnerability. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, C. B. Field et al., Eds., Cambridge University Press, 65–108.
- Carreño, M. L., O. D. Cardona, and A. H. Barbat, 2004: *Metodología para la Evaluación del Desempeño de la Gestión del Riesgo*. Monografía Cinne IS-51, Universidad Politécnica de Cataluña, 98 pp.
- , —, and —, 2007: A disaster risk management performance index. *Nat. Hazards*, **41**, 1–20, doi:10.1007/s11069-006-9008-y.
- CENAPRED, 2013: *Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Occurridos en la República Mexicana en el Año 2011*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, No. 13, Secretaría de Gobernación, 403 pp.
- CLIVAR, 2011: Project report on WCRP Workshop on Drought Predictability and Prediction in a Changing Climate. WCRP Informal Rep. 21/2011, International CLIVAR Publication Series 162, 33 pp. [Available online at http://eprints.soton.ac.uk/189815/9/ICPO_162_WCRP_drought_Report.pdf.]
- CONAGUA, 2013: *Estadísticas del Agua en México*. SEMANART, 176 pp.
- Cutter, S. L., 1996: Vulnerability to environmental hazards. *Prog. Hum. Geogr.*, **20**, 529–539, doi:10.1177/030913259602000407.
- , J. T. Mitchell, and M. S. Scott, 2000: Revealing the vulnerability of people and places: A case study of Georgetown County, South Carolina. *Ann. Assoc. Amer. Geogr.*, **90**, 713–737, doi:10.1111/0004-5608.00219.
- Delgadillo, M. J., O. T. Aguilar, and V. D. Rodríguez, 1999: Los aspectos económicos y sociales de El Niño. *Los impactos de El Niño en México*, V. Magaña, Ed., Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México y Secretaría de Gobernación, 181–210.
- Dessai, S., W. N. Adger, M. Hulme, J. Kohler, J. Turnpenny, and R. Warren, 2003: Defining and experiencing dangerous climate change. Working Paper 28, Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, 11 pp. [Available online at <http://www.tyndall.ac.uk/sites/default/files/wp28.pdf>.]
- DOF, 2012: Acuerdo por el que se instruyen acciones para mitigar los efectos de la sequía que atraviesan diversas entidades federativas. Diario Oficial de la Federación, accessed 30 December 2015. [Available online at http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5231010&fecha=25/01/2012.]
- Downing, T., 1990: Assessing socioeconomic vulnerability to famine: Frameworks, concepts and applications. Final Rep. U.S. Agency for International Development Famine Early Warning System Project, 196 pp. [Available online at http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/pnabj875.pdf.]
- Eakin, H., and A. Luers, 2006: Assessing the vulnerability of social-environmental systems. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, **31**, 365–394, doi:10.1146/annurev.energy.30.050504.144352.
- FAO, 2003: Unlocking the water potential of agriculture. Natural Resources and Environment, UN-FAO, 62 pp. [Available online at ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/unlocking_e.pdf.]
- , 2013: Afrontar la escasez de agua: Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. FAO Informe Sobre Temas Hídricos 38, FAO, 97 pp. [Available online at <http://www.fao.org/docrep/018/i3015s/i3015s.pdf>.]
- Feng, S., A. B. Krueger, and M. Oppenheimer, 2010: Linkages among climate change, crop yields and Mexico–US cross-border migration. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **107**, 14257–14262, doi:10.1073/pnas.1002632107.
- García, V., 1993: Las sequías históricas de México. *Desastres Soc.*, **1** (1), 83–96.
- Grossi, P., and H. Kunreuther, Eds., 2005: *Catastrophe Modeling: A New Approach to Managing Risk*. Springer, 245 pp.
- Hamdy, A., 1992: Irrigation with treated municipal wastewater. *Medit*, **3** (1), 50–54.
- Hewitt, K., 1983: The idea of calamity in a technocratic age. *Interpretations of Calamity from the Viewpoint of Human Ecology*, K. Hewitt, Ed., Allen and Unwin, 3–32.
- Howden, M., S. Schroeter, S. Crimp, and I. Hanigan, 2014: The changing roles of science in managing Australian droughts: An agricultural perspective. *Wea. Climate Extremes*, **3**, 80–89, doi:10.1016/j.wace.2014.04.006.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, 976 pp.
- , 2012: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge University Press, 582 pp.
- ISDR, 2003: Drought—Living with risk: An integrated approach to reducing societal vulnerability to drought. Discussion Group Doc., International Strategy for Disaster Reduction, 41 pp.
- Jiménez Cisneros, B., J. C. Durán Álvarez, and J. M. Méndez Contreras, 2010: Calidad. *El Agua en México: Cauces y Encauces*, B. Jiménez Cisneros, L. Torregosa y Armentia, and L. Aboites Aguilar, Eds., Academia Mexicana de Ciencias, 265–290.
- Kelly, P. M., and W. N. Adger, 2000: Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. *Climatic Change*, **47**, 325–352, doi:10.1023/A:1005627828199.
- Keyantash, J., and J. A. Dracup, 2002: The quantification of drought: An analysis of drought indices. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1167–1180, doi:10.1175/1520-0477(2002)083<1191:TQODAE>2.3.CO;2.
- Korenfeld Federman, D., F. I. Arreguín Cortés, and M. López Pérez, 2014: Constructing a framework for National Drought Policy: The way forward in Mexico. *Wea. Climate Extremes*, **3**, 90–94, doi:10.1016/j.wace.2014.04.003.
- Langner, A., 2012: La sequía provoca grandes pérdidas en México. *El Economista*, 9 February. [Available online at <http://eleconomista.com.mx/finanzas-publicas/2012/02/09/sequia-propicia-grandes-perdidas>.]
- Lavell, A., 1996: Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: Hacia la definición de una agenda de investigación. *Ciudades en Riesgo*, M. A. Fernández, Ed., RED-USAID, 21–59.
- Liverman, D., 1990: Vulnerability to global environmental change. *Understanding Global Environmental Change: The Contribution of Risk Analysis and Management*, R. E. Kasperson et al., Eds., Clark University, 8–23.
- Luers, A. L., 2005: The surface of vulnerability: An analytical framework for examining environmental change. *Global Environ. Change*, **15**, 214–223, doi:10.1016/j.gloenvcha.2005.04.003.
- , D. B. Lobell, L. S. Sklar, C. L. Addams, and P. A. Matson, 2003: A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. *Global Environ. Change*, **13**, 255–267, doi:10.1016/S0959-3780(03)00054-2.
- Lyon, B., M. A. Bell, M. K. Tippet, A. Kumar, M. P. Hoerling, X. W. Quan, and H. Wang, 2012: Baseline probabilities for the seasonal prediction of meteorological drought. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **51**, 1222–1237, doi:10.1175/JAMC-D-11-0132.1.
- Magaña, V., 1999: *Los Impactos de El Niño en México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México y Secretaría de Gobernación, 229 pp.
- , and C. Neri, 2012: Cambio climático y sequías en México. *Revista Ciencia*, **63** (4), 26–35. [Available online

- at http://revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/63_4/PDF/sequiasMexico.pdf.]
- Maskrey, A., 1993: *Los Desastres No Son Naturales*. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, 137 pp.
- McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scale. *Proc. Eighth Conf. on Applied Climatology*, Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc., 179–184.
- Meadow, A. M., M. A. Crimmins, and D. B. Ferguson, 2013: Field of dreams, or dream team? Assessing two models for drought impact reporting in the semiarid Southwest. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 1507–1517, doi:10.1175/BAMS-D-11-00168.1.
- Méndez, M., and V. Magaña, 2010: Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *J. Climate*, **23**, 1175–1188, doi:10.1175/2009JCLI3080.1.
- Moreno Vázquez, J. L., B. Marañón Pimentel, and D. López Córdova, 2010: Los acuíferos sobreexplotados: Origen, crisis y gestión social. *El Agua en México: Cauces y Encauces*, B. Jiménez Cisneros, L. Torregosa y Armentia, and L. Aboites Aguilar, Eds., Academia Mexicana de Ciencias, 79–116.
- O'Brien, K., and Coauthors, 2008: Disaster risk reduction, climate change adaptation and human security: A commissioned report for the Norwegian Ministry of Foreign Affairs, Rep. 2008: 3, 76 pp. [Available online at http://www.preventionweb.net/files/7946_GECHSReport3081.pdf.]
- OECD, 2003: Environmental indicators: Development, measurement and use. OECD Reference Paper, 37 pp. [Available online at <http://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/24993546.pdf>.]
- , 2008: Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide. OECD, 158 pp. [Available online at <http://www.oecd.org/std/42495745.pdf>.]
- , 2009: Managing Water for All: An OECD Perspective on Pricing and Financing. OECD, 151 pp. [Available online at <http://www.oecd.org/tad/sustainable-agriculture/44476961.pdf>.]
- , 2013: Wastewater treatment. *Environment at a Glance 2013: OECD Indicators*, OECD, 38–39, doi:10.1787/9789264185715-11-en.
- Ortega-Gaucin, D., 2012: Reglas de operación para el sistema de presas del Distrito de Riego 005 Delicias, Chihuahua, México. *Ing. Agric. Biosist.*, **4** (1), 31–39, doi:10.5154/r.inagbi.2011.12.11015.
- Palerm Viqueira, J., J. Collado Moctezuma, and B. Rodríguez Haros, 2010: Retos para la administración y gestión del agua de riego. *El Agua en México: Cauces y Encauces*, B. Jiménez Cisneros, L. Torregosa y Armentia, and L. Aboites Aguilar, Eds., Academia Mexicana de Ciencias, 141–178.
- Pineda Pablos, N., 2011: La cobranza renuente y el marco normativo de las tarifas de agua potable en México. *Los Servicios del Agua en el Norte de México: Gestión, Manejo Financiero y Aspectos Ambientales*, I. Aguilar-Benítez, Ed., El Colef y El Colson, 185–215.
- Quadri de la Torre, G., 2011: Subsidios vs medio ambiente en México: El absurdo y las oportunidades. Cuaderno de Debate 7, CIDE, 37 pp. [Available online at [http://energia Debate.com/wp-content/uploads/2011/09/Quadri\[1\].pdf](http://energia Debate.com/wp-content/uploads/2011/09/Quadri[1].pdf).]
- Quan, X. W., M. P. Hoerling, B. Lyon, A. Kumar, M. A. Bell, M. K. Tippett, and H. Wang, 2012: Prospects for dynamical prediction of meteorological drought. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **51**, 1238–1252, doi:10.1175/JAMC-D-11-0194.1.
- Rijsberman, F. R., 2006: Water scarcity: Fact or fiction? *Agric. Water Manage.*, **80**, 5–22, doi:10.1016/j.agwat.2005.07.001.
- Sánchez, A., 2006: 1944 Water treaty between Mexico and the United States: Present situation and future potential. *Frontera Norte*, **18**, 125–144.
- Sandoval Minero, R., 2010: La evolución del marco institucional del agua potable y el saneamiento urbanos en México: In análisis cognitivo preliminar. *El Agua en México: Cauces y Encauces*, B. Jiménez Cisneros, L. Torregosa y Armentia, and L. Aboites Aguilar, Eds., Academia Mexicana de Ciencias, 625–646.
- Sheffield, J., E. F. Wood, and M. L. Roderick, 2012: Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, **491**, 435–438, doi:10.1038/nature11575.
- SMN, 2011: Reporte del clima en México. Año 1, Núm. 6, Comisión Nacional del Agua, Servicio Meteorológico Nacional, 12 pp. [Available online at <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/analisis/reporte/RC-Junio11.pdf>.]
- Steinemann, A., 2014: Drought information for improving preparedness in the western states. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 843–847, doi:10.1175/BAMS-D-13-00067.1.
- Tate, E., 2012: Social vulnerability indices: A comparative assessment using uncertainty and sensitivity analysis. *Nat. Hazards*, **63**, 325–347, doi:10.1007/s11069-012-0152-2.
- Tsakiris, D., A. Loukas, D. Pangalou, H. Vangelis, D. Tigkas, G. Rossi, and A. Cancellier, 2009: Drought characterization. *Drought Management Guidelines Technical Annex*, A. Iglesias, M. Moneo, and A. Lopez-Francos, Eds., 85–102. [Available online at http://www.iamz.ciheam.org/medroplan/guidelines/complete_technical.html.]
- Turner, B. L., and Coauthors, 2003: A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **100**, 8074–8079, doi:10.1073/pnas.1231335100.
- UNDP, 2004: *Reducing Disaster Risk: A Challenge for Development*. United Nations Development Programme, 146 pp.
- UNISDR, 2004: *Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 588 pp.
- , 2009: *Terminology on Disaster Risk Reduction*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 30 pp.
- , 2011: *Revealing Risk, Redefining Development*. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction, United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 178 pp.
- , 2013: *From Shared Risk to Shared Value: The Business Case for Disaster Risk Reduction*. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction, United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 288 pp.
- USAID, 2014: Design and use of composite indices in assessments of climate change vulnerability and resilience. USAID Doc., 60 pp. [Available online at http://community.eldis.org/5b9bfc3/Design_Use_of_Composite_Indices.pdf.]
- Wilder, M., C. A. Scott, N. Pineda Pablos, R. G. Varady, G. M. Garfin, and J. McEvoy, 2010: Adapting across boundaries: Climate change, social learning, and resilience in the U.S.–Mexico border region. *Ann. Assoc. Amer. Geogr.*, **100**, 917–928, doi:10.1080/00045608.2010.500235.
- Wilhite, D. A., and S. L. Rhodes, 2005: Drought mitigation in the United States: Progress by state government. *Drought Assessment, Management, and Planning: Theory and Case Studies*, D. A. Wilhite, Ed., Kluwer Academic Publishers, 237–251.
- , M. V. K. Sivakumar, and R. Pulwarty, 2014: Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. *Wea. Climate Extremes*, **3**, 4–13, doi:10.1016/j.wace.2014.01.002.
- WMO and GWP, 2014: National drought management policy guidelines: A template for action. IDMP Tools and Guidelines Series 1, WMO and GWP, 48 pp. [Available online at http://www.gwp.org/Global/About%20GWP/Publications/Integrated%20Drought%20Management%20Programme/GWP_NDMPG_final_web.pdf.]

8. REFERENCIAS

American Meteorological Society (AMS), 1997: Meteorological drought-policy statement. Bull, Amer. Meteor. Soc 78: 847-849.

Arreguín, F., M. López and H. Marengo, 2011: Mexico's Water challenges for the 21st century. Water resources in Mexico: scarcity, degradation, stress, conflicts, management, and policy, U. Oswald, Ed., Springer, 21-39.

Birkmann, J., 2006: Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: conceptual frameworks and definitions. Measuring vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies, J. Birkmann, Ed., UN University Press, 9-54.

Blaikie, P., T. Cannon, I. Davis and B. Wisner, 1994: At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters. Routledge, 284 pp.

Bogardi, J. and Birkmann, J., 2004: Vulnerability assessment: the first step towards sustainable risk reduction. In: Malzahn, D., Plapp, T. (Eds.), Disaster and Society—From Hazard Assessment to Risk Reduction. Logos Verlag, Berlin. 75–82

Borja-Vega C. and A. de la Fuente, 2013: Municipal Vulnerability to Climate Change and Climate-Related Events in Mexico. Policy Research Working Paper Núm. 6417. The World Bank, Social Development Department, Sustainable Development Network.

Breña, A. F., 2004: Precipitación y Recursos hidráulicos en México. Universidad Autónoma Metropolitana, 316 pp.

Cardona, O.D., 1990: Terminología de Uso Común en Manejo de Riesgos. AGID Reporte No. 13, Escuela de Admon., Finanzas, y Tecnología, Medellín, Colombia.

Cardona, O.D., 2005: Sistema de Indicadores para la Gestión del Riesgo de Desastre. Programa para América Latina y el Caribe. Informe Técnico Principal. Instituto de Estudios Ambientales, Universidad de Colombia. Inter American Development Bank, Wasington D.C.

Cardona, O.D., 2006: A system of indicators for disaster risk management in the Americas. Measuring vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies, J. Birkmann, Ed., United Nations University Press, 189-209.

Cardona, O.D., M.G. Ordaz, L.E. Yamín, M.C. Marulanda, and A.H. Barbat, 2008: Earthquake loss assessment for integrated disaster risk management. *Journal of Earthquake Engineering*, 12 (S2), 48-59.

Cardona, O.D., M.K. van Aalst, J. Birkmann, M. Fordham, G. McGregor, R. Perez, R.S. Pulwarty, E.L.F. Schipper, and B.T. Sinh, 2012: Determinants of risk: exposure and vulnerability. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 65-108.

Carreño, M. L., O.D. Cardona, A. H. Barbat, 2004: Metodología para la evaluación del desempeño de la gestión del riesgo, Monografía CIMNE IS-51, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

Castorena, G., M. E. Sánchez, M. E. Florescano, R. G. Padilla y U. L. Rodríguez, 1980: Análisis histórico de las sequías en México. Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México. 137 pp.

Cendrero, A., 1997: Riesgos naturales e impacto ambiental. En: Fundación Universidad-Empresa (Ed.). *La interpretación de la problemática ambiental, enfoques básicos II*. Madrid. 23-84.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 2013: Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2011. Serie Impacto socioeconómico de los desastres en México nro. 13. Secretaría de Gobernación. 403 pp.

CENAPRED, 2014: Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2012. Serie Impacto socioeconómico de los desastres en México nro. 14. Secretaría de Gobernación. 292 pp.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2000: Un tema del desarrollo: la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres. Documento presentado en el Seminario “Enfrentando Desastres Naturales: Una Cuestión del Desarrollo”. Nueva Orleans, 25 y 26 de marzo de 2000. Elaborado por Zapata R, Rómulo C y Mora S. 47 pp.

Courtenay, L. and D. A. Wilhite (eds.), 2005: From Disaster Response to Risk Management: Australia's National Drought Policy. Springer Publishers. Dordrecht, The Netherlands. 212 pp.

CONAGUA, 2014a: Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía. Consejo de Cuenca Costa de Guerrero. 1a. versión. 66 pp.

CONAGUA, 2014b: Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía. Consejo de Cuenca Costa de Oaxaca. 1a. versión. 70 pp.

CONAGUA, 2015: Estadísticas del Agua en México. SEMARNAT. México. 298 p.

CONAGUA. 2016:. Estadísticas del Agua en México. SEMARNAT. México. 282 p.

Contreras, C., 2005: Las sequías en México durante el siglo XIX. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Núm. 56. 118-133.

Curl, K., C. Neri and C. Scott. 2015. Drought and Water Scarcity: Discourses and Competing Water Demands in the Context of Climate Change in Arid Sonora, Mexico. In: Adaptation to Climate Change through Water Resources Management: Capacity, equity and sustainability. Earthscan series on Studies in WRM. 21-42.

Cutter, S., B., J. Boruff and W. Shirley, 2013: Social Vulnerability to Environmental Hazards. Social Science Quarterly. Volumen 84, Número 2, 242-261.

Dai, A., 2013: Increasing drought under global warming in observations and models. Nature Climate Change 3(1):52-58.

DARA, 2012: Climate Vulnerability Monitor 2nd Edition. A Guide to the Cold Calculus of a Hot Planet. Climate Vulnerable Forum. 62 pp.

Diario Oficial de la Federación (DOF), 2012: Acuerdo por el que se instruyen acciones para mitigar los efectos de la sequía que atraviesan diversas entidades federativas.

[Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5231010&fecha=25/01/2012]

Djalante, R., 2012: Adaptive governance and resilience: the role of multi-stakeholder platforms in disaster risk reduction. *Natural Hazards and ESS*, 12 (9): 2923-2942.

Dutra, E., and Coauthors, 2014: Global meteorological drought - Part 1: Probabilistic monitoring. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 11, 889-917.

Florescano, E. y S. Saw, 1995: Breve historia de la sequía en México. Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. México. 246 pp.

Folger, P., B. A. Cody, and N. T. Carter, 2013: Drought in the United States: causes and issues for congress. Congressional Research Service (CRS). 36 pp.

Franco, A., 2015: Predictibilidad del clima de México y reducción de escala dinámica. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra. UNAM. 111 pp.

Fritzsche, K., Schneiderbauer, S., Buseck, P., Kienberger, S., Buth, M., Zebisch, M. and Kahlenborn, W., 2014: The Vulnerability Sourcebook. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

García, Acosta, V., 1993: Las sequías históricas de México. *Desastres y Sociedad*, Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, 1, 83-96.

García, Acosta. V., J. M. Pérez; y A. Molina, 2003: Desastres Agrícolas en México. Catálogo Histórico. Tomo I. Épocas prehispánica y colonial 958-1822. CIESAS-FCE. México. 506 pp.

Grossi, P. and H. Kunreuther, 2005: Catastrophe Modeling: A new approach to managing risk. Eds., Springer, New York, NY, 245 pp.

Gu, Y., Brown, J.F., Verdin, J.P., Wardlow, B., 2007: A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophys. Res. Lett.* 34 pp.

Hahn, M. B., Riederer, A. M., and Foster, S. O., 2009: The Livelihood Vulnerability Index: A pragmatic approach to assessing risks from climate variability and change—A case study in Mozambique. *Global Environmental Change*, 19(1), 74-88.

Hanak, H., J. Mount y C. Chappelle, 2016: La reciente sequía en California. Just de FACTS. Public Policy Institute of California, Water Policy Center. 3 pp.

Heim, R., 2002: A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1149–1165.

Hernández, M. E., G. Carrasco, G. Álfaro, 2007: Mitos y realidades de la sequía en México, UNAM, Instituto de Geografía, México. 148 pp.

Hewitt, K., 1983. The idea of calamity in a technocratic age. *Interpretations of Calamity from the Viewpoint of Human Ecology*. K. Hewitt, Ed., Allen and Unwin, 3–32.

Instituto Mexicano para la Competitividad A.C. (IMCO), 2012; Índice de vulnerabilidad climática de las ciudades mexicanas. [Disponible en: <http://vulnerabilidadclimatica.org.mx/>]

Instituto Nacional de Ecología (INE), 2013: Guía Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad ante Cambio Climático. Informe elaborado por el Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Coordinado por Magaña, Victor. 62 pp.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, 976 pp.

IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G. K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley, Eds., Cambridge University Press, 582 pp.

Jiménez, B., J.C. Durán, y C. Méndez, C. 2010: Calidad. El Agua en México: causas y encauses. B. Jiménez, L. Torregosa y L. Aboites, Eds., Academia Mexicana de Ciencias. 265-290.

Keyantash, J. and J.A. Dracup, 2002: The Quantification of Drought: An Analysis of Drought Indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 1167-1180.

Korenfeld, D., F.I. Arreguín, and M. López, 2014: Constructing a framework for National Drought Policy: The way forward in Mexico. *Weather and Climate E.*, 3, 90-94.

Lavell, A., 1996: Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación. *Ciudades en Riesgo*, M.A. Fernández, Ed., La RED-USAID, 21-59.

Lavell, A. and E. Franco, 1996: Estado, sociedad y gestión de los desastres en América Latina: En búsqueda de paradigma perdido. LA RED, Tercer Mundo, Bogotá.

Lyon, B., M.A. Bell, M.K. Tippett, A. Kumar, M.P. Hoerling, X.W. Quan, and H. Wang, 2012: Baseline Probabilities for the Seasonal Prediction of Meteorological Drought. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 51, 1222-1237.

Magaña, V. O. (ed.), 1999: Los impactos de El Niño en México. Dirección General de Protección Civil-Secretaría de Gobernación, México. 219 pp.

Magaña, V., J.L.A. Vázquez, J.L.A. Pérez, and J.B.A. Pérez, 2003: Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional* 42:313–330.

Magaña V. y C. Neri. 2012: Cambio climático: sequías en México. *Revista Ciencia*. Octubre-diciembre. 25-35.

Malik, S., Awan, H., Khan, N., 2012: Mapping vulnerability to climate change and its repercussions on human health in Pakistan. *Globalization and Health*.

Márdero, S., Nickl, E., Schomook, B., Schneider, L., Rogan, J., Christman, Z., & Lawrence, D., 2012: Sequías en el sur de la península de Yucatán: análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. *Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 78, 19-33.

Maskrey, A., 1993: Los Desastres No son Naturales. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, LA RED, Tercer Mundo Editores, 137 pp.

Maskrey, A., 1994: Viviendo en riesgo: Comunidades vulnerables y prevención de desastres en america latina. In: Chapter: Comunidad y desastres en América Latina: Estrategias de intervención, LA RED, CEPREDENAC, FLACSO, Bogota, 25-58.

McKee, T.B., N.J. Doesken, and J. Kleist, 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scale, Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, CA. American Meteorological Society, Boston, MA. 179-184.

Méndez, J. M. 2010: Variabilidad espacio-temporal de la sequía meteorológica en México: aspectos dinámicos. Tesis de Doctorado, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM, México. 112 pp.

Méndez, J. M. and V. Magaña, 2010: Regional Aspects of Prolonged Meteorological Droughts over Mexico and Central America. J. of C. Vol. 23. No. 5. 1175-1188 pp.

Mendoza, B.; Velasco, V. and Jáuregui, E., 2006: A study of historical droughts in northeastern Mexico. Jour. of Clim. 19, 2916-2934.

Mishra, A. K., and V. P. Singh, 2010: A review of drought concepts. Journal of Hydrology, 391, 202-216.

Monterroso R. A., Fernández, A., Trejo, R., Conde, A., Escandón, J., Villers, L., Gay, C., 2013: Vulnerabilidad y adaptación a los efectos del cambio climático en México. Universidad Autónoma de Chapingo; CCA, IdG, PICC -UNAM.

National Drought Mitigation Center (NDMC), 2004: Spotting Drought Before It's Too Late. University of Nebraska–Lincoln. [Disponible en: <http://drought.unl.edu/>]

Navarro-Chaparro, K., P. Rivera y R. Sánchez, 2016: Análisis del manejo de agua en la ciudad de Tijuana, B.C. Factores críticos y retos. Estudios fronterizos, 17(33), 53-82.

Neri, C., 2010: Elementos para un Sistema de Alerta Temprana ante Sequías. Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM, México. 105 pp.

Neri, C., and V. Magaña, 2016: Estimation of vulnerability and risk to meteorological drought in Mexico. Weather, Climate, and Society. 8:2, 95-110.

O'Brien, K., S. Eriksen, L. Sygna, and L.O. Naess, 2006: Questioning complacency: Climate change impacts, vulnerability, and adaptation in Norway. *Ambio*, 35(2), 50-56

O'Brien, K., L. Sygna, R. Leichenko, W. N. Adger, J. Barnett, T. Mitchell, L. Schipper, T. Tanner, C. Vogel and C. Mortreux, 2008: Disaster Risk Reduction, Climate Change Adaptation and Human Security. A Commissioned Report for the Norwegian Ministry of Foreign Affairs, 76 pp.

Organización de los Estados Americanos (OEA), 1993: Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional. Washington, D.C.

Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2003: Environmental Indicators. Development, Measurement and Use. Paris. 37 pp.

OECD, 2009: Managing Water for All. An OECD Perspective on Pricing and Financing. Paris. 151 pp.

Palerm, J., J. Collado, J. y B. Rodríguez, 2010: Retos para la administración y gestión del agua de riego. El Agua en México: causas y encauses. B. Jiménez, L. Torregosa y L. Aboites, Eds., Academia Mexicana de Ciencias. 141-178.

Peters, A. J., E. A. Walter-Shea, L. Ji, A. Viña, M. Hayes and M. D. Svoboda, 2002: Drought monitoring with NDVI based standardized vegetation index. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, vol. 68, n°1, p. 71–75.

Pozzi, W., and Coauthors, 2013: Toward Global Drought Early Warning Capability: Expanding International Cooperation for the Development of a Framework for Monitoring and Forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, 776-785.

Preston, B.L. and Stafford-Smith, M. 2009: Framing vulnerability and adaptive capacity assessment. Discussion Paper. CSIRO Climate Adaption Flagship W.P. No. 2.

Quan, X.W., M.P. Hoerling, B. Lyon, A. Kumar, M.A. Bell, M.K. Tippett, and H. Wang, 2012: Prospects for Dynamical Prediction of Meteorological Drought. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51, 1238-1252.

Reyes, L., 1997: Identificación y análisis de sequías. Tesis de Maestría. División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM. México. 208 pp.

Servicio Meteorológico Nacional (SMN), 2011: Reporte del clima en México. Comisión Nacional del Agua. Año 1. Núm. 6. 12 pp.

Sivakumar, M. V. K., R. Stefanski, M. Bazza, S. Zelaya, D. Wilhite, and A. R. Magalhaes, 2014: High Level Meeting on National Drought Policy: Summary and Major Outcomes, *Weather and Climate Extremes*, Vol. 3, pp. 126-132.

Soares, D., Romero, R. y López R., 2010: Índice de vulnerabilidad Social. En: Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Volumen III. Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático Coords.: Polioptro F. Martínez Austria y Carlos Patiño Gómez. IMTA. 9-38

Steinemann, A., 2003: Drought indicators and triggers: A stochastic approach to evaluation. *J. Amer. Water Res. Assoc.*, 39,1217–1234.

Steinemann, A. C., 2006: Using Climate Forecasts for Drought Management. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45, 1353-1361.

Tompkins, E.L., M.C. Lemos, and E. Boyd, 2008: A less disastrous disaster: Managing response to climate-driven hazards in the Cayman Islands and NE Brazil. *Global Environmental Change*, 18, 736-745.

Torres, R. R., Lapola, D. M., Marengo, J. A., and Lombardo, M. A., 2012: Socio-climatic hotspots in Brazil. *Climatic Change*, 115(3-4), 597-609.

United States Agency for International Development (USAID), 2014: Design and use of composite indices in assessments of climate change vulnerability and resilience, 60 pp.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR), 2004: Living with risk: a global review of disaster reduction initiatives. 588 pp.

UNISDR, 2009: Terminology on Disaster Risk Reduction, 30 pp.

UNISDR, 2011: Revealing Risk, Redefining Development. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 178 pp.

UNISDR, 2013: From Shared Risk to Shared Value - The Business Case for Disaster Risk Reduction. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 288 pp.

UNISDR, 2015: Making Development Sustainable: The Future of Disaster Risk Management. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. Geneva, Switzerland: United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR). 316 pp.

Wilches Chaux, G., 1998: Auge, Caída y Levantada de Felipe Pinillo, Mecánico y Soldador o Yo Voy a Correr el Riesgo. IT Perú y LA RED, Delta S.C. Quito, Ecuador.

Wilhite, D.A. and Glantz M.H., 1985: Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions Water International 10 (3), 111-120.

Wilhite, D.A., M.J. Hayes, C. Knutson, and K.H. Smith, 2000: Planning for Drought: Moving from Crisis to Risk Management. Journal of the American Water Resources Association, 36: 697-710.

Wilhite, D.A., M.V.K. Sivakumar, and R. Pulwarty, 2014: Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. Weather and Climate E., 3, 4-13.

World Meteorological Organization (WMO), 1975: Drought. Special environmental report N. 5. WMO. No. 403. Geneva, Switzerland.

WMO, 1986: Report on Drought and Countries Affected by Drought During 1974–1985, WMO, Geneva, 118 pp.

WMO, 2012. Standardized Precipitation Index User Guide. Geneva, Sw. 24 pp.

Xia, Y., M. B. Ek, C. D. Peters-Lidard, D. Mocko, M. Svoboda, J. Sheffield, and E. F. Wood, 2014: Application of USDM statistics in NLDAS-2: Optimal blended NLDAS drought index over the continental United States, J. Geophys. Res. Atmos., 119, 2947–2965.

CONAGUA, 2015. PRONACOSE. <http://www.pronacose.gob.mx/>

CONABIO, 2015. Portal de Geoinformación. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Corporación OSSO. 2015. Desinventar Inventario Histórico de Desastres de México. Corporación OSSO, La Red, UNISDR. <http://online.desinventar.org/>

IMTA-CONAGUA, 2016: <http://www.edistritos.com/estadisticas/>

IRI, 2015. U.S. - Mexico Drought Analysis Tool
https://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/Drought/N_America/US_Mexico/Analysis.html#tabs-1

IRI, 2016a: IRI Analyses SPI: Standardized Precipitation Index analyses of multiple global precipitation datasets. <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.IRI/.Analyses/.SPI/fx>

IRI, 2016b: U.S. - U.S. - Mexico Drought Prediction Tool: SPI Persistence Forecast
https://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/Drought/N_America/US_Mexico/Opt_Persist.html

SMN-CONAGUA, 2014: Monitor de Sequía de América del Norte
<http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-de-america-del-norte>

SIAP-SAGARPA, 2016. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Volúmenes de almacenamiento de agua en las principales presas del país.
http://www.campomexicano.gob.mx/portal_siap/Monitor/gas/agua/presas.pdf

SIACON-SAGARPA, 2016. SIAP. <http://www.gob.mx/siap/>

SINA-CONAGUA, 2016. <http://201.116.60.25/sina/>

SMN-CONAGUA, 2013: Estaciones Meteorológicas Automáticas.
<http://smn.cna.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>