

5

Peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en el contexto del cambio climático en México

David Ortega-Gaucin, Jesús de la Cruz Bartolón y
Heidy Viviana Castellano Bahena
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col.
Progreso, C.P. 62550, Jiutepec, Morelos. E-mail: dortega@tlaloc.imta.mx





RESUMEN

El cambio climático está provocando una intensificación en la variabilidad climática natural, con un aumento en la frecuencia y severidad de las sequías en muchas partes del mundo. El peligro por sequía se refiere a la probabilidad de que ocurra un evento de sequía en un espacio y tiempo determinados con suficiente intensidad como para producir daños; la vulnerabilidad ante la sequía es el grado en que un sistema es susceptible e incapaz de hacer frente a los efectos adversos, daños o perjuicios causados por este fenómeno natural; y el riesgo por sequía está determinado por la confluencia del peligro y la vulnerabilidad. Con base en estos conceptos, en este artículo se presentan los resultados de la aplicación de una metodología desarrollada por los autores para determinar índices municipales de peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en México. Los resultados indican que la metodología es viable para su aplicación a nivel nacional, e inclusive puede ser adaptado para aplicarse a nivel estatal o regional. Su principal ventaja es que se basa en un procedimiento analítico objetivo que permite identificar los municipios más vulnerables desde los puntos de vista económico, social y ambiental, y aquellos con mayor propensión y riesgo de ser afectados por sequía. Se concluye que los resultados obtenidos pueden ser útiles para los tomadores de decisiones y los responsables de formular políticas públicas en varios sentidos, tales como: establecer prioridades en la implementación de medidas de prevención y mitigación; entender dónde y cómo mejorar las capacidades de adaptación; entender dónde y cómo disminuir la exposición y la sensibilidad; y, en última instancia, optimizar la distribución de recursos de los diversos programas gubernamentales orientados al desarrollo social, los cuales contribuyen al fortalecimiento de capacidades para hacer frente a los fenómenos hidrometeorológicos extremos y a la adaptación al cambio climático.

Palabras clave: Sequía, vulnerabilidad, riesgo, prevención, mitigación, capacidad de adaptación.

5.1. Introducción

El cambio climático global ha provocado de forma gradual, la intensificación de la variabilidad climática natural, con un aumento en la frecuencia y severidad de los fenómenos hidrometeorológicos extremos (como las sequías y las inundaciones) que dañan los bienes y la integridad física de las personas, en una cadena compleja de impactos que afectan prácticamente a todas las dimensiones del desarrollo humano (Landa *et al.*, 2008). La sequía es un fenómeno natural que forma parte intrínseca del clima y al que eventualmente todos los lugares del planeta están expuestos, incluso las zonas más lluviosas del mundo. Se caracteriza por ser un evento inevitable y todavía poco predecible, no tiene epicentro ni trayectoria precisa, es de avance lento y gradual, y abarca grandes extensiones geográficas, razones por las cuales se hace difícil identificar sus límites espaciotemporales y proporcionar ayuda a la población afectada por el fenómeno (Ortega-Gaucin, 2013).

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013), las tendencias previstas para el siglo XXI como resultado del cambio climático indican una menor disponibilidad natural de agua en muchas regiones del mundo (Figura 5.1).

En el caso específico de México, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2016) ha elaborado mapas con mayor detalle para la república mexicana, con base en los nuevos escenarios de emisión de las denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). En la Figura 5.2 se presentan los mapas de anomalía de precipitación esperada para el período 2015-2039, para los escenarios RCP 6.0 y RCP 8.5. En ambos casos se esperan disminuciones en la precipitación del orden de -10 a -20% en la mayor parte del norte del país y de 0 a -10% en el resto de la república, con excepción de algunas zonas ubicadas en estados del sureste (Chiapas, Oaxaca y Quin-

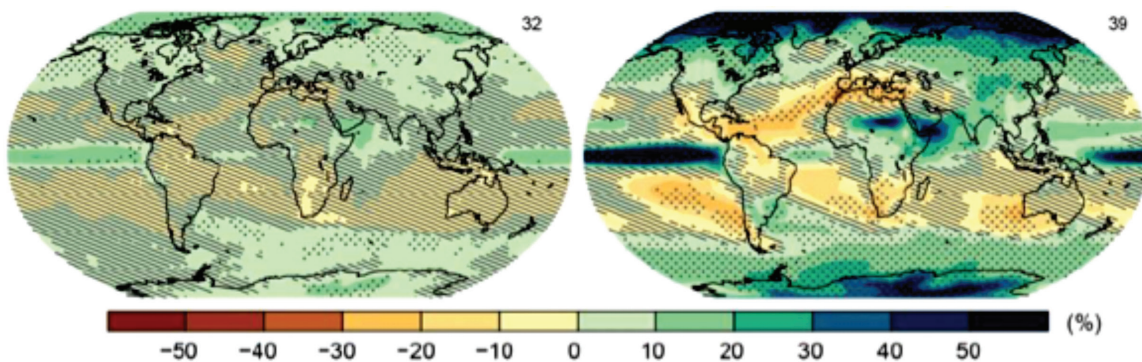


Figura 5.1. Cambios esperados en la precipitación promedio mundial para el periodo 2081-2100 respecto del periodo 1986-2005, con base en los escenarios RCP 2.6 (izquierda) y RCP 8.5 (derecha). Fuente: IPCC (2013).



tana Roo) donde se esperan incrementos en la lluvia de 0 a 10% bajo el escenario RCP 6.0.

En este contexto, como consecuencia de la disminución de la lluvia y el aumento asociado de la temperatura y la evaporación en gran parte del país, es de esperarse que las sequías ocurran con mayor frecuencia y severidad, sobre todo en los estados del norte, los cuales se caracterizan por tener climas secos y semi-secos, donde la precipitación promedio oscila entre 300 y 500 milímetros anuales.

Debido al cambio climático, el peligro de que ocurran sequías severas está aumentando y, dado el incremento en la vulnerabilidad, la condición de riesgo alcanza niveles críticos con mayor frecuencia. Para establecer cuánto es mucho o poco riesgo se requiere cuantificar, al menos en términos relativos, el peligro y la vulnerabilidad. A través de la construcción de escenarios de riesgo cuantitativos, los tomadores de decisiones podrán priorizar las acciones de adaptación necesarias para pre-

pararse a un clima diferente al actual (Magaña, 2013).

Ante estas circunstancias cabe preguntarse ¿Cuál es la vulnerabilidad, el peligro y el riesgo por sequía que existe actualmente en México y cómo podrían comportarse estas variables en el futuro cercano como consecuencia del cambio climático? Para dar respuesta a esta interrogante es necesario conocer la distribución espacial y dimensionar a través de indicadores e índices cuantitativos la vulnerabilidad, el peligro y el riesgo de nuestro país ante la sequía. No obstante, no existe una metodología que sea unánimemente aceptada para este propósito, por lo que el presente trabajo tiene como objetivo proponer una metodología para determinar índices y mapas de peligro, vulnerabilidad (económica, social y ambiental) y riesgo por sequía en México, usando indicadores relativos a escala municipal. Estos índices y mapas pueden ser útiles para los tomadores de decisiones y los responsables de formular políticas públicas para identificar prioridades de inversión en reducción de la vulnerabilidad,

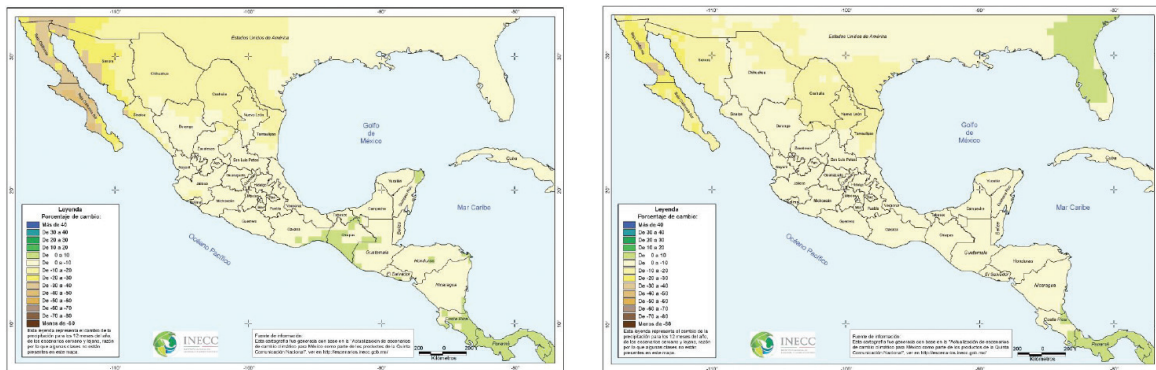


Figura 5.2. Cambios esperados en la precipitación promedio anual de México para el período 2015-2039, según los escenarios RCP 6.0 (izquierda) y RCP 8.5 (derecha). Fuente: INECC (2016)

y para identificar y proponer acciones efectivas de gestión del riesgo, considerando aspectos económicos, sociales y ambientales.

5.2. Los conceptos de peligro, vulnerabilidad y riesgo

El climático peligroso, en general, es una condición de tiempo o clima que puede provocar efectos negativos en un sistema vulnerable. Por lo general, el peligro se estima con información meteorológica o climática histórica y se representa por la probabilidad de que ocurra un fenómeno meteorológico particular (por ejemplo, ciclón tropical, lluvia torrencial, etc.). En este caso, el peligro que nos interesa es el fenómeno de la sequía (entendida en su sentido más amplio, es decir, aquella disminución severa y prolongada de la lluvia que es capaz de provocar graves desequilibrios hidrológicos y afectar las actividades humanas y los ecosistemas). Así, el peligro por sequía se refiere a la probabilidad de que ocurra un evento de sequía en un espacio y tiempo determinados con suficiente intensidad como para producir daños. Los valores del peligro varían de una región a otra y dependen de las características específicas del fenómeno estudiado (Magaña, 2013).

Por otro lado, la vulnerabilidad, en general, es una condición de fragilidad o debilidad de un individuo o sistema ante algún tipo de amenaza (sea ésta de origen físico como las sequías, terremotos, inundaciones, o de tipo

antropogénico como los accidentes, devoluciones, crisis económicas, etc.). Tiene un carácter multifacético y multidimensional; es dinámica tanto espacial como temporalmente; y está siempre vinculada a un peligro específico (Birkmann, 2007). Así, para los propósitos del presente trabajo, la vulnerabilidad ante la sequía se entiende como: el grado en que un sistema es susceptible e incapaz de hacer frente a los efectos adversos, daños o perjuicios causados por este fenómeno natural. De esta manera, la vulnerabilidad está vinculada a los impactos potenciales ocasionados por los episodios de sequía, y se utiliza para evaluar la susceptibilidad de los sistemas socioeconómicos y ambientales (representados en este caso por los municipios de México) ante este peligro.

La exposición es un factor que genera vulnerabilidad, de tal forma que si no hay exposición a un fenómeno específico no existe riesgo. En el presente artículo se trabaja con el concepto de riesgo, como la combinación del peligro y la vulnerabilidad, tal como se ilustra en la Figura 5.3. Es decir, el riesgo es la probabilidad de que se produzca un daño en las personas, en uno o varios ecosistemas, originado por un fenómeno natural (en este caso una sequía) o antropogénico (DOF, 2012). Así, un sistema es vulnerable y se encuentra en riesgo por sequía en la medida en que esté expuesto a este peligro natural.

En este sentido, los desastres pueden considerarse como una "materialización del riesgo", lo que significa que, en ocasiones, éste



Figura 5.3. Diagrama de la estructura del riesgo bajo cambio climático.

Fuente: adaptada de CEPAL (2000).

alcanza niveles por encima de un valor crítico. Explicar un desastre requiere documentar tanto las características de los peligros como las de la vulnerabilidad, no sólo considerando el enfoque naturalista que explica el desastre únicamente como la expresión de las fuerzas de la naturaleza (Magaña, 2013). En décadas recientes, los desastres provocados por fenómenos naturales han aumentado a nivel mundial como resultado principalmente del incremento en la vulnerabilidad (IPCC, 2012), y sólo en parte por cambios en las características del peligro mismo. La mayor exposición de la población a fenómenos meteorológicos extremos, ha resultado en mayor número de desastres.

De esta forma, con base en los conceptos descritos anteriormente, desarrollamos la metodología para determinar índices de peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía que se describe a continuación.

5.3. Metodología

La metodología propuesta consta de tres etapas (Figura 5.4): primero se realiza el análisis del peligro por sequía a escala municipal, con base en los registros históricos del Monitor de Sequía de México (MSM); posteriormente se obtienen índices de vulnerabilidad ante la sequía, tomando en cuenta aspectos econó-

micos, sociales y ambientales de los municipios de México; y finalmente se determinan los índices de riesgo por sequía, mediante la combinación de los índices de peligro y vulnerabilidad. En los siguientes apartados se describe puntualmente cada una de estas etapas.

5.1.1. Primera etapa: análisis del peligro por sequía

En México, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es la dependencia oficial del gobierno encargada de proporcionar información meteorológica (estado del tiempo) y climatológica. Para ello utiliza las redes de observación tales como estaciones automáticas, observatorios sinópticos, radares, estaciones

de radiosondeo y estaciones receptoras de imágenes de satélite. Como parte de sus actividades de monitoreo, el SMN se encarga de detectar el estado actual y la evolución de la sequía mediante el Monitor de Sequía en México (MSM) que a su vez forma parte del Monitor de Sequía de América del Norte (NADM, por sus siglas en inglés). El MSM inició su operación en 2002 dentro de las actividades del NADM, pero fue hasta el año de 2014 que adquirió su carácter nacional, lo que le permitió emitir mapas de sequía en escala de tiempo diferente a la mensual, siempre basada en la metodología utilizada por el Monitor de Sequía de Estados Unidos (USDM, por sus siglas en inglés) y el NADM. A partir de febrero de 2014 la emisión del MSM es quincenal.

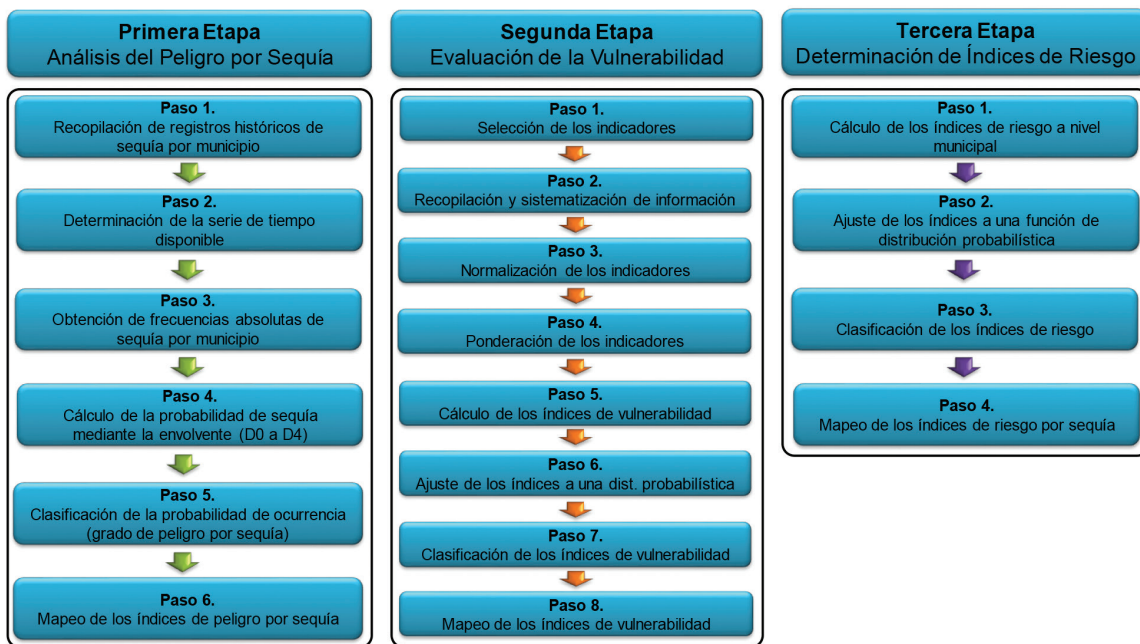


Figura 5.4. Etapas que conforman la metodología para determinar índices de peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en México. Fuente: elaboración propia.



La metodología del MSM se basa en la obtención e interpretación de diversos índices o indicadores de sequía tales como el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), el Índice Satelital de Salud de la Vegetación (VHI), el Modelo de Humedad del Suelo Leaky Bucket, y el Índice Normalizado de Diferencia de la Vegetación (NDVI), entre otros, los cuales se complementan con la aportación de expertos locales. Estos índices se despliegan en capas o *layers* a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG) y mediante un consenso se determinan las regiones afectadas por sequía, de acuerdo a la escala de intensidades que es común en los tres países (Estados Unidos, México y Canadá), que va desde anormalmente seco (D0), sequía moderada (D1), sequía severa (D2), sequía extrema (D3), hasta sequía excepcional (D4).

Así, con base en los registros históricos del MSM (enero de 2003 a junio de 2018) para cada categoría de sequía y en función de los datos municipales, se determinó el peligro por sequía mediante el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de sequía (frecuencia relativa) para cada uno de los municipios de México, con base en los pasos siguientes:

Paso 1. Recopilación de los registros históricos de sequía por municipio. De la página Web del MSM (<http://smn.cna.gob.mx/>), se obtuvo la base de datos de los registros históricos de los municipios con al menos el 40% de su territorio afectado por alguna intensidad o condición de sequía, desde D0 (condición anormal seca) hasta D4 (sequía excepcional).

Paso 2. Determinación de la serie de tiempo disponible. Tomando en cuenta desde el primero hasta el último mes reportado por el MSM, se analizaron los datos correspondientes al periodo de enero de 2003 a junio de 2018; así, el total de meses examinados fue de 186. Sin embargo, debido a factores externos, el Monitor de Sequía no se elaboró en agosto de 2003 ni en febrero de 2004, por lo que el total de meses incluidos en el análisis fue de 184.

Paso 3. Obtención de las frecuencias absolutas correspondientes a cada tipo de severidad de sequía por municipio. Como ya se mencionó, se tomaron en cuenta aquellos municipios con al menos el 40% de su territorio afectado por algún grado de sequía (D0 a D4). En el periodo de febrero de 2014 a junio de 2018 los registros se encontraron de manera quincenal. Sin embargo, dado que el análisis se realizó de manera mensual, se contabilizaron únicamente los registros correspondientes a la segunda quincena de cada mes en el periodo mencionado. Para obtener las frecuencias absolutas se realizó un conteo de los municipios afectados por sequía en los 184 meses registrados.

Paso 4. Cálculo de la probabilidad de sequía mediante la envolvente (D0 a D4). La probabilidad de ocurrencia de un evento determinado, es decir el nivel de certeza que tenemos de que ocurra dicho suceso, es la razón entre el número de veces en que ocurrió dicho evento y el número de repeticiones del experimento. A esta razón se le denomina frecuencia relativa. Para calcular la frecuencia relativa con

que ocurre la sequía en un determinado municipio se utilizó la siguiente fórmula:

$$P(A) = \frac{A}{N}$$

Ecuación 5.1

Dónde:

- P = Es la probabilidad de ocurrencia de sequía
- A = Es el número de meses con sequía
- N = El número total de registros en el periodo

Paso 5. Clasificación de la probabilidad de ocurrencia (grado de peligro por sequía). Los valores de la probabilidad oscilan en un rango cerrado de [0, 1]. Con el objetivo de clasificar estas probabilidades en percentiles con categorías de igual tamaño se ajustaron estos valores a una distribución normal y el resultado se multiplicó por 100 para expresarlas en porcentaje. Dado que se tienen cinco categorías de clasificación de la probabilidad de la sequía, entonces cada rango de percentil obedece al 20% (Tabla 5.1).

Paso 6. Mapeo de los índices de peligro por sequía. El mapa de peligro por sequía se realizó mediante el software ArcGis®, utilizando

como mapa base el Marco Geoestadístico Nacional (INEGI, 2018), el cual permite referenciar correctamente la información estadística con los lugares geográficos correspondientes, que en este caso son los municipios.

5.1.1. Segunda etapa: evaluación de la vulnerabilidad ante la sequía

Con la finalidad de propiciar una mejor comprensión de la multidimensionalidad de la vulnerabilidad, la metodología se basa en la concepción de vulnerabilidad del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2007), en la que ésta se explica en función de tres componentes: el grado de exposición (GE), la sensibilidad (S) y la capacidad de adaptación (CA). El grado de exposición se define como la posibilidad de un sistema de quedar expuesto a un cambio ante una posible situación desestabilizadora positiva o negativa; la sensibilidad se refiere al grado en que un sistema responde a variaciones del entorno; y la capacidad de adaptación se refiere a la aptitud de un sistema para adecuarse o ajustarse a las nuevas condiciones de su entorno. Los dos primeros componentes juntos representan el impacto potencial (I) del fenómeno (es decir, la magnitud del daño esperado), y la capacidad

Tabla 5.1. Categorías para clasificar la probabilidad de las diferentes categorías de sequía.

Clasificación de la probabilidad	Valor del percentil
Muy baja	$0 < P \leq 20$
Baja	$20 < P \leq 40$
Media	$40 < P \leq 60$
Alta	$60 < P \leq 80$
Muy alta	$80 < P \leq 100$

Fuente: elaboración propia.



de adaptación es la medida en que estos impactos pueden ser evitados; por lo tanto, la vulnerabilidad es igual al impacto potencial menos la capacidad de adaptación, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$V = f(I - CA) = f(GE + S - CA)$$

Ecuación 5.2

De acuerdo con la Ecuación 5.2, al existir mayor grado de exposición y sensibilidad se tendrá mayor vulnerabilidad ante la sequía; y, en caso contrario, una mayor capacidad de adaptación en comparación con los otros dos parámetros, resultará en una menor vulnerabilidad.

Además de lo anterior, es importante tomar en cuenta que existen varios tipos de vulnerabilidad (física, económica, política, institucional, educativa, etc.) (Wilches-Chaux, 1993). Por ello, para efectos de este trabajo, se analizaron cuatro tipos de vulnerabilidad ante la sequía: económica, social, ambiental y global, cuyos conceptos son los siguientes:

- *Vulnerabilidad económica:* Se formula a partir de la relación indirecta entre los niveles de ingresos y el impacto de la sequía, provocando el aumento en el riesgo de padecer el desastre debido a la falta de financiamiento a la producción, insuficiencia de ingresos, desempleo o subempleo e inestabilidad laboral, entre otros.
- *Vulnerabilidad social:* Se refiere, por una parte, a la inseguridad e indefensión que experimentan las comunidades, familias

e individuos en sus condiciones de vida ante el impacto causado por una sequía. La pobreza, la marginación, el rezago social, la dificultad de acceso a los servicios de salud, educación y recreación, limitan la capacidad de prevenir, mitigar y dar respuesta oportuna ante una situación de desastre por déficit hídrico.

- *Vulnerabilidad ambiental:* Está relacionada con la susceptibilidad intrínseca del medio o los recursos naturales a sufrir daños por la falta de agua, debido a que todos los seres vivos necesitan de ciertas condiciones ambientales para desarrollarse, y en caso de existir un deterioro de la naturaleza por la vía de la destrucción de las reservas del ambiente, los ecosistemas resultan altamente vulnerables ante amenazas como la sequía.
- *Vulnerabilidad global:* Es la integración de los tres tipos de vulnerabilidad descritos anteriormente, en la cual confluyen factores de tipo económico, social y ambiental.

Con base en los conceptos anteriores, se desarrolló esta etapa de la metodología para determinar índices de vulnerabilidad (económica, social, ambiental y global) ante la sequía, la cual consta de ocho pasos, mismos que se describen a continuación.

Paso 1. Selección de los indicadores. La formulación de un índice de vulnerabilidad debe estar basada en indicadores que reflejen aspectos relevantes y orientadores del tipo de acción

que se debe llevar a cabo por los tomadores de decisiones a nivel nacional. Así, de todos los indicadores posibles, se deben seleccionar aquéllos que sean más relevantes, con base en la disponibilidad de datos, en el juicio personal o en investigación previa (Stathatou *et al.*, 2014).

De acuerdo con el estudio realizado por el Banco Interamericano de Desarrollo (Cardona, 2007), los indicadores que cumplen mejor la función de medir la exposición y/o susceptibilidad física ante cualquier tipo de desastre son los que reflejan población susceptible, activos, inversiones, producción, medios de sustento, patrimonios esenciales y actividades humanas; también pueden considerarse como indicadores de este tipo los que reflejan tasas de crecimiento y densidad poblacional. Por otro lado, la sensibilidad o fragilidad socioeconómica se representa mediante indicadores de pobreza, inseguridad humana, dependencia, analfabetismo, desigualdad social, desempleo, inflación, deuda y degradación ambiental; estos indicadores reflejan debilidades relativas o condiciones de deterioro que agravarían los efectos directos causados por fenómenos peligrosos; aunque dichos efectos no necesariamente son aditivos y, en algunos casos, podrían considerarse redundantes o correlacionados, su influencia es de especial importancia a nivel económico y social. Finalmente, la capacidad de adaptación puede representarse por un amplio número de indicadores relacionados con el nivel de desarrollo humano, el capital humano, la redistribución económica, la gobernabilidad, la protección

financiera, la percepción colectiva, la preparación para enfrentar situaciones de crisis y la protección ambiental; este conjunto de indicadores por sí solos y particularmente desagregados en el nivel local podrían facilitar la identificación y la orientación de las acciones que se deben promover, fortalecer o priorizar para lograr un mayor nivel de seguridad.

Así, con base en lo descrito líneas arriba y tomando en cuenta estudios previos de vulnerabilidad ante la sequía realizados en México (CONAGUA, 2012; Ortega-Gaucin *et al.*, 2018), para los efectos de la presente investigación se seleccionó un conjunto de 24 indicadores de tipo social, económico y ambiental (Tabla 5.2), cuyos valores fueron obtenidos a nivel municipal a partir de cifras, índices, tasas o proporciones existentes en bases de datos generadas por instituciones reconocidas en el país, tales como: el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); la Comisión Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL); la Secretaría de Agricultura, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA); la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA); el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP); la Comisión Nacional de Población (CONAPO); la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR); y la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). A partir de los 24 indicadores elegidos se construyó una matriz mediante la agrupación de los mismos en las tres componentes de la vulnerabilidad (exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación) y en los cuatro tipos de vulnerabilidad



analizados (económica, social, ambiental y global), tal como se indica en la Tabla 5.2.

Como se observa en esta tabla, para el cálculo de la vulnerabilidad global ante la sequía, se tomaron en cuenta todos y cada uno de los indicadores descritos anteriormente, siguiendo el procedimiento que se indica más adelante.

Paso 2. Recopilación y procesamiento de información. Este paso consistió en recopilar la información necesaria para determinar el valor de cada uno de los indicadores considerados en el análisis, de acuerdo con las fórmulas y las fuentes de información que se presentan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.2. Matriz de indicadores seleccionados y agrupados en los tipos y componentes de la vulnerabilidad ante la sequía.

Tipo de vulnerabilidad		Componentes de la vulnerabilidad		
		Grado de exposición (GE)	Sensibilidad (S)	Capacidad de Adaptación (CA)
		Indicadores		
Global	Económica	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Densidad de población (hab/km²) ✓ Población económicamente activa desocupada (%) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Valor de la producción agrícola de riego y temporal (miles \$) ✓ Valor de la producción del ganado en pie (miles \$) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Superficie rehabilitada al riego (ha) ✓ Superficie agrícola tecnificada (ha) ✓ Longitud de caminos rurales (km)
	Social	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Población en condiciones de pobreza (%) ✓ Población sin derechohabencia a servicios de salud (%) ✓ Población analfabeta (%) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Viviendas sin agua entubada (%) ✓ Viviendas sin drenaje ni excusado (%) ✓ Viviendas sin energía eléctrica (%) ✓ Viviendas con piso de tierra (%) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ingreso per cápita anual (dólares) ✓ Beneficiarios del programa Oportunidades (%) ✓ Beneficiarios del programa Liconsa (%) ✓ Años promedio de escolaridad (adim.)
	Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Grado de explotación de las cuencas (adim.)* ✓ Grado de explotación de los acuíferos (adim.)* 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Deforestación (% de área crítica forestal) ✓ Superficie afectada por incendios forestales (ha) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Superficie reforestada (ha) ✓ Áreas naturales protegidas (% de área)

* Debido a su importancia para la sequía, estos dos indicadores están contemplados en los tres tipos de vulnerabilidad: económica, social y ambiental. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.3. Fórmulas y fuentes de información para el cálculo de los indicadores.

Indicador	Fórmula y unidades de medida	Fuente de información
Densidad de población (DP)	$DP = \frac{\text{No. habitantes}}{\text{Área (km}^2\text{)}} ; \text{ hab/km}^2$	INEGI
Población económicamente activa desocupada (PEAD)	$PEAD = \frac{\text{PEA desocupada}}{\text{PEA total}} ; \%$	INAFED
Población sin derecho a servicios de salud (PSD)	$PSD = \frac{\text{Pob. derechohabiente}}{\text{pob. total}} \%$	CONEVAL
Población en condiciones de pobreza (PCP)	$PCP = \frac{\text{Pob. en condiciones de pobreza}}{\text{Pob. total}} \%$	CONEVAL
Población analfabeta (PA)	$PA = \frac{\text{No. hab misma edad no saben leer}}{100 \text{ hab misma edad}} ; \%$	CONAPO
Viviendas sin agua entubada (VSA)	$VSA = \frac{\text{No. viv. sin serv. agua entubada}}{\text{No. total viviendas}} ; \%$	CONAGUA
Viviendas sin drenaje ni excusado (VSD)	$VSD = \frac{\text{No. viv. sin drenaje ni excusado}}{\text{No. total viviendas}} ; \%$	CONAGUA
Viviendas sin energía eléctrica (VSE)	$VSE = \frac{\text{No. viv. sin energía eléctrica}}{\text{No. total viviendas}} ; \%$	CONAPO
Viviendas con piso de tierra (VPT)	$VPT = \frac{\text{No. viv. con piso de tierra}}{\text{No. total viviendas}} ; \%$	CONAPO
Ingreso per cápita anual (IPC)	$IPC = \frac{\text{PIB anual (dólares)}}{\text{No. habitantes}} ; \text{ dólares/hab}$	PNUD
Años promedio de escolaridad (APE)	Años acumulados de educación en personas mayores a 24 años; adim.	PNUD
Beneficiarios del programa Oportunidades (BPO)	$BPO = \frac{\text{No. beneficiarios Liconsa}}{\text{No. habitantes}} ; \%$	INEGI
Beneficiarios del programa Liconsa (BPL)	$BPL = \frac{\text{No. beneficiarios Linconsa}}{\text{No. habitantes}} ; \%$	INEGI
Longitud de caminos rurales (LCR)	LCR; cantidad, km	INEGI
Valor de la producción agrícola de riego y temporal (VPA)	VPA; cantidad, miles de \$	SAGARPA
Valor de la producción del ganado en pie (VPG)	VPG; cantidad, miles de \$	SAGARPA
Superficie rehabilitada al riego (SRR)	SRR; cantidad, ha	SAGARPA
Superficie agrícola tecnificada (SAT)	SAT; cantidad, ha	SAGARPA
Grado de explotación de las cuencas (GEC)	$GEC = \frac{\text{Vol. anual de extr. sup. (hm}^3\text{)}}{\text{Vol. medio anual escurr. (hm}^3\text{)}} ; \text{ adim.}$	CONAGUA
Grado de explotación de los acuíferos (GEA)	$GEA = \frac{\text{Vol. extracción (hm}^3\text{)}}{\text{Rec arg a media anual (hm}^3\text{)}} ; \text{ adim.}$	CONAGUA
Deforestación (DF)	$DF = \frac{\text{Área deforestada (km}^2\text{)}}{\text{Área total (km}^2\text{)}} ; \%$	CONAFOR
Superficie afectada por incendios forestales (SAI)	$DF = \frac{\text{Área afectada por incendios (km}^2\text{)}}{\text{Área total (km}^2\text{)}} ; \%$	CONAFOR
Superficie reforestada (SR)	SR; cantidad, ha	CONAFOR
Áreas naturales protegidas (ANP)	$ANP = \frac{\text{Área cob. veg. protegida (km}^2\text{)}}{\text{Área total (km}^2\text{)}} ; \%$	CONANP

Fuente: elaboración propia.



Paso 3. Normalización de los valores de los indicadores. Debido a que los indicadores están expresados en diferentes unidades de medida, fue necesario normalizarlos, con el propósito de que todos estuvieran expresados en valores adimensionales que oscilaran en un rango entre 0 y 1. Para llevar a cabo este procedimiento, primero se identificó la relación funcional del indicador respecto a la vulnerabilidad ante la sequía. Existen dos tipos posibles de relaciones funcionales: la vulnerabilidad aumenta o disminuye con el valor del indicador. En el primer caso, la relación es directa y se identifica con el símbolo \uparrow ; en el segundo caso, la relación es inversa y se denota mediante el símbolo \downarrow . De los 24 indicadores seleccionados, todos los que pertenecen a las componentes de grado de exposición (**GE**) y sensibilidad (**S**), tienen una relación directa (\uparrow) con la vulnerabilidad, mientras que los indicadores que representan la capacidad de adaptación (**CA**), tienen una relación inversa con la misma (\downarrow). Por lo anterior, una vez identificado el impacto positivo o negativo de los indicadores sobre la vulnerabilidad, se procedió a normalizarlos mediante las fórmulas que se describen a continuación:

$$X_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

Ecuación 5.3

Y en el caso de los indicadores con una relación funcional inversa (\downarrow), se utilizó la siguiente:

$$X_i = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}}$$

Ecuación 5.4

Donde, en ambas ecuaciones se tiene que: X_i es el valor normalizado de los valores de la variable x_i ; x_{\min} y x_{\max} son los valores mínimo y máximo del conjunto de datos x_i respectivamente.

Paso 4. Ponderación de los indicadores. Una vez obtenidos los valores normalizados de los indicadores, se procedió a calcular sus pesos usando el método propuesto por Iyengar y Sudarshan (1982), mediante la siguiente expresión:

$$P_i = \frac{1}{(\sigma_i) \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i} \right)}$$

Ecuación 5.5

Donde: P_i es el peso del indicador normalizado i ; σ_i es la desviación estándar del conjunto de valores del indicador i ; y n es el número de indicadores seleccionados.

Este método de ponderación garantiza que grandes variaciones de uno o más indicadores, no dominen la contribución del resto de los indicadores.

Paso 5. Cálculo de los índices de vulnerabilidad.

Para determinar los índices de vulnerabilidad global, primero se calcularon los índices de vulnerabilidad económica, social y ambiental (*IVE*, *IVS* e *IVA*, respectivamente), mediante la siguiente fórmula:

$$IVE, IVS, IVA = \sum_{i=1}^n X_i P_i$$

Ecuación 5.6

Donde: X_i es el valor normalizado del indicador i ; P_i es el peso del indicador normalizado i ; n es el número de indicadores correspondientes a cada tipo de vulnerabilidad.

Y posteriormente se calcularon los índices de vulnerabilidad global (IVG), asumiendo un peso P_i de 1/3 para cada una de sus componentes:

$$IVG = \frac{IVE}{3} + \frac{IVS}{3} + \frac{IVA}{3}$$

Ecuación 5.7

Paso 6. Ajuste de los índices a una función de distribución probabilística. Con la finalidad de clasificar en categorías los índices de vulnerabilidad obtenidos, éstos se ajustaron a la distribución probabilística beta, siguiendo la recomendación de Iyengar y Sudarshan (1982), quienes afirman que dicha distribución es la adecuada para este propósito, dado que generalmente es sesgada y toma valores en el intervalo (0,1).

Paso 7. Clasificación de los índices de vulnerabilidad. Para clasificar los índices de vulnerabilidad (IV) con base en su probabilidad de ocurrencia, primero se multiplicaron por 100 los valores de probabilidad obtenidos para expresarlos en porcentaje, y luego se agruparon en cinco categorías de percentiles de igual tamaño (de 20% cada una de ellas), de tal manera que se definieron cinco grados de vulnerabilidad, tal como se indica en la Tabla 5.4.

Paso 8. Mapeo de los índices de vulnerabilidad. Los mapas de vulnerabilidad económica, social, ambiental y global, se realizaron de manera similar a los mapas de peligro por sequía, es decir, mediante el software ArcGis®, utilizando como mapa base el Marco Geoestadístico Nacional (INEGI, 2018).

5.1.1. Tercera etapa: determinación de los índices de riesgo por sequía

Una vez que han sido calculados los índices de peligro (probabilidad de ocurrencia) y los índices de vulnerabilidad global ante la sequía, es posible determinar los índices de riesgo a

Tabla 5.4. Categorías para clasificar el grado de vulnerabilidad ante la sequía.

Grado de vulnerabilidad	Valor del percentil
Muy baja	$0 < IV_i \leq 20$
Baja	$20 < IV_i \leq 40$
Moderada	$40 < IV_i \leq 60$
Alta	$60 < IV_i \leq 80$
Muy alta	$80 < IV_i \leq 100$

Fuente: elaboración propia.



partir de la combinación de los dos anteriores. Es decir, el riesgo por sequía es la probabilidad de que se produzca un daño en las personas, en uno o varios ecosistemas, como consecuencia de una sequía, y es directamente proporcional al peligro y a la vulnerabilidad del sistema analizado. De esta manera, los pasos que se siguieron para obtener y mapear los índices de riesgo fueron:

Paso 1. Cálculo de los índices de riesgo a nivel municipal. Estos índices se determinaron mediante la fórmula:

$$IR = P * IVG$$

Ecuación 5.8

Donde: *IR* es el índice de riesgo por sequía; *P* es la probabilidad de ocurrencia de sequía; e *IVG* es el índice de vulnerabilidad global ante la sequía.

Paso 2. Ajuste de los índices a una función de distribución probabilística. Los valores de los índices de riesgo oscilan en un rango cerrado de [0, 1]. Con la finalidad de clasificar en categorías estos índices, se ajustaron a la distri-

bución probabilística normal y el resultado se multiplicó por 100 para expresarlos en porcentaje.

Paso 3. Clasificación de los índices de riesgo. De manera similar a los índices de peligro y vulnerabilidad, los índices de riesgo por sequía se agruparon en cinco categorías donde cada una de ellas corresponde a un rango de percentil de 20% (Tabla 5.5).

Paso 4. Mapeo de los índices de riesgo por sequía. El mapa de riesgo por sequía se realizó de forma análoga a los mapas de peligro y vulnerabilidad, es decir, mediante el software ArcGis®, utilizando como mapa base el Marco Geoestadístico Nacional (INEGI, 2018).

5.4. Resultados y discusión

5.1.1. Mapa nacional de peligro por sequía

En la Figura 5.5 se presenta el mapa nacional de peligro por sequía. En este mapa se puede

Tabla 5.5. Categorías para clasificar los índices de riesgo por sequía.

Grado de riesgo	Valor del percentil
Muy bajo	$0 < IR \leq 20$
Bajo	$20 < IR \leq 40$
Medio	$40 < IR \leq 60$
Alto	$60 < IR \leq 80$
Muy alto	$80 < IR \leq 100$

Fuente: elaboración propia.

observar claramente que, según los registros del Monitor de Sequía en México, los estados de la república donde existe mayor probabilidad de que ocurra sequía con algún grado de severidad –desde moderada hasta extrema– son los del noroeste (Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa) y los de la altiplanicie mexicana (Chihuahua, Durango, Coahuila, Nuevo León, Jalisco, Zacatecas, Michoacán). Estos resultados coinciden con los registros históricos de más largo plazo de las sequías ocurridas en México (e.g. Florescano, 2000; CENAPRED, 2014), pues los estados del territorio nacional que históricamente han sido más afectados por las sequías –y donde se presenta con mayor fre-

cuencia este fenómeno– están ubicados en el norte y en el altiplano mexicano. En orden de severidad de sus efectos desfavorables se encuentran: Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, Baja California, Sonora, Sinaloa, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro e Hidalgo (CENAPRED, 2014). Estos estados tienen el agravante de estar ubicados en zonas que se caracterizan por ser eminentemente áridas, por lo que su población y las distintas actividades económicas son altamente vulnerables ante la escasez y la falta de agua provocada por sequía, dado que en la mayor parte de estos estados predominan los climas secos y semi-secos extremos.

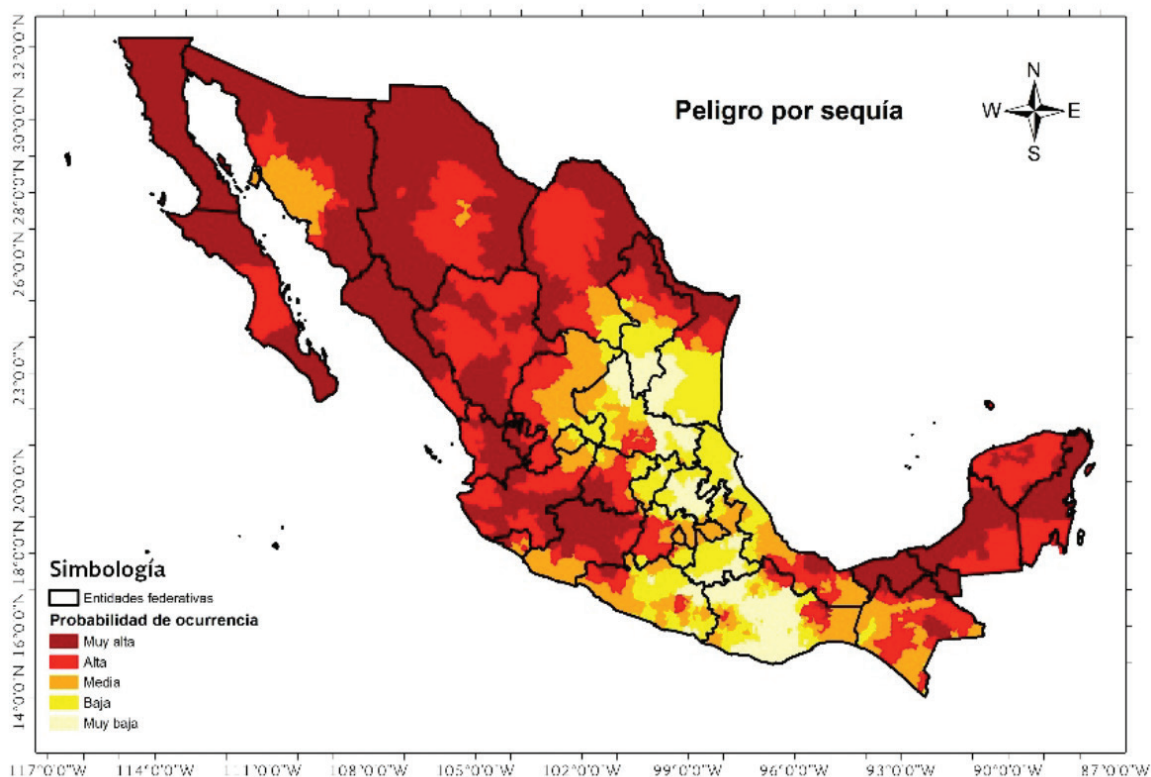


Figura 5.5. Mapa nacional de peligro por sequía. Fuente: elaboración propia.



Sin embargo, también es posible apreciar que en algunos estados del sureste que son típicamente lluviosos como Tabasco, Chiapas y los que se ubican en la península de Yucatán (Campeche, Yucatán y Quintana Roo), se presenta una probabilidad alta y muy alta de que sean afectados por sequías con distinto grado de severidad. Esto nos indica que el fenómeno de la sequía puede ocurrir –y de hecho sucede– en cualquier tipo de clima, y no es exclusivo de los climas secos como comúnmente se piensa (Wilhite, 2011).

Los efectos del cambio climático, como ya se ha mencionado, tendrán secuelas en la disminución de la precipitación del orden de -10 a -20% en la mayor parte del norte del país y de 0 a -10% en el resto de la república, con excepción de algunas zonas ubicadas en estados del sureste (Chiapas, Oaxaca y Quintana Roo) donde se esperan incrementos en la lluvia de 0 a 10% (INECC, 2016). Con ello, se espera que se incremente la frecuencia y severidad de las sequías, sobre todo en el norte de la república mexicana, donde ya de por sí el agua es escasa debido a las condiciones climatológicas imperantes en las zonas áridas y semiáridas del país. Indudablemente, ello tendrá incidencia directa sobre los estados y municipios más vulnerables, tal como se analiza a continuación.

5.1.2. Mapas nacionales de vulnerabilidad ante la sequía

En la Figura 5.6 se presentan los mapas nacionales de vulnerabilidad económica, social, ambiental y global a escala municipal para

la república mexicana. Con respecto a la vulnerabilidad económica, los estados que presentan mayor grado de vulnerabilidad (alta y muy alta) se ubican en diferentes latitudes: en el norte se encuentran Baja California y Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Durango y San Luis Potosí, entre otros; y en el centro se encuentran Hidalgo, Guanajuato, Puebla y Estado de México, principalmente. Estos resultados coinciden en términos generales con los registros de declaratorias de desastre por sequía emitidas por la SAGARPA en el período 2000-2015. De acuerdo con estos registros, los estados que han tenido más declaratorias de desastre por sequía en el sector agropecuario son los siguientes: en el norte Chihuahua, Coahuila, Durango, Sonora, Sinaloa, San Luis Potosí y Nuevo León, principalmente; en el centro Puebla, Guanajuato y Estado de México; y en el sur y sureste Guerrero, Veracruz, Chiapas y Yucatán, entre otros. Esto es debido a que todos estos estados se caracterizan por tener una actividad agrícola y ganadera intensa, por lo que generan un alto valor de la producción agropecuaria con respecto al total nacional (en conjunto, los estados mencionados generan en promedio el 60.5% del valor de la producción agropecuaria).

En lo que respecta a la vulnerabilidad social, los estados de la república mexicana que tienen mayor proporción de municipios con alto y muy alto grado de vulnerabilidad, se ubican principalmente en el sur y centro del país: destacando los estados de Oaxaca y Guerrero que tienen más del 75% de sus municipios en condiciones de alta y muy alta vulnerabilidad

social. Estos resultados son similares a los obtenidos en otros estudios de vulnerabilidad social realizados en México (e.g. Soares *et al.*, 2015), donde los municipios más vulnerables desde el punto de vista social, se ubican en el sur del país, y entre ellos destacan los estados de Oaxaca y Guerrero como los más críticos, lo cual se debe a la larga historia de pobreza, marginación y rezago social en que se encuentran sus habitantes.

Por otro lado, en lo relativo a la vulnerabilidad ambiental, los estados que presentan mayor grado de vulnerabilidad (alta y muy alta) son principalmente los que se ubican en el noroeste (Baja California, Baja California Sur,

Sonora, Sinaloa) y en la altiplanicie mexicana (Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, San Luis Potosí, Zacatecas, Querétaro, Guanajuato, Aguascalientes, Michoacán e Hidalgo, entre otros). Dentro de los factores ambientales que propician en mayor medida el hecho de que una región sea vulnerable a los efectos causados por la sequía se encuentra, sin lugar a dudas, la degradación de los recursos naturales (también conocida como degradación ambiental), causada por la sobreexplotación de cuencas y acuíferos, la deforestación, los cambios de uso del suelo, el sobrepastoreo y los incendios forestales; los cuales incrementan significativamente el grado de exposición y la sensibilidad de la población y del

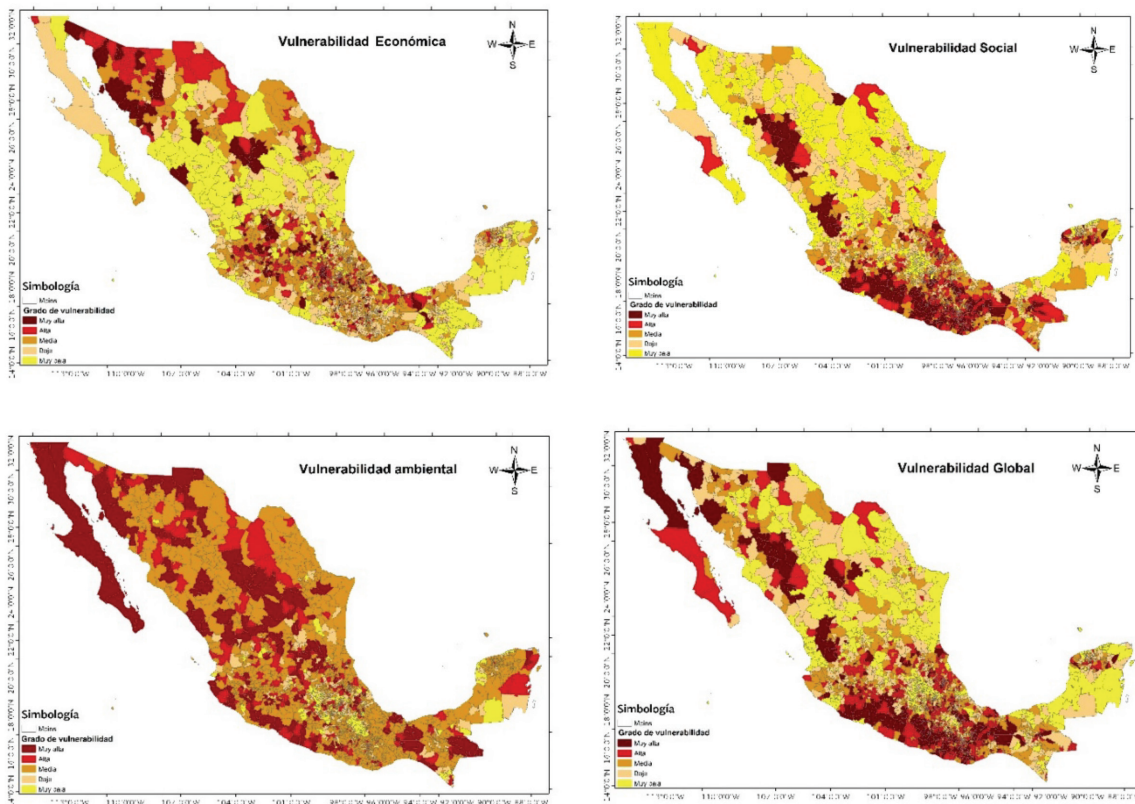


Figura 5.6. Mapas de vulnerabilidad económica, social, ambiental y global ante la sequía en México. Fuente: elaboración propia.



ambiente frente a este peligro natural. Todos estos factores tienen como consecuencia que se produzcan cambios climáticos de mayor o menor escala. Al cambiar la superficie del terreno, al deforestar, quemar, desviar cauces de ríos, pavimentar y degradar los suelos, la tierra pierde rápidamente su capacidad de atrapar y retener humedad. Esto genera microclimas áridos que terminan por alterar el patrón climático regional. Como resultado de ello, las zonas áridas pueden hacerse aún más secas y extenderse (Moreno, 2004).

En México más de 100 de los 653 acuíferos están siendo sobreexplotados (CONAGUA, 2017), lo cual causa un daño ambiental considerable y pone en riesgo la seguridad hídrica y alimentaria. Además, 31 acuíferos tienen presencia de suelos salinos y agua salobre, localizados principalmente en la península de Baja California y la altiplanicie mexicana, donde convergen condiciones de poca precipitación pluvial, altos índices de radiación solar y por tanto de evaporación, así como la presencia de aguas congénitas y minerales evaporíticos de fácil disolución. En algunos casos, como el acuífero costero de Hermosillo, Sonora, el bombeo en exceso ha ocasionado la intrusión de agua salada y el ensalitramiento de los terrenos agrícolas.

Y finalmente, como resultado de la combinación de los tres tipos de vulnerabilidad analizados (económica, social y ambiental), se tiene que los estados con mayor grado de vulnerabilidad global ante la sequía son principalmente los que se ubican en el

noroeste (Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa), y en la altiplanicie mexicana (Chihuahua, Coahuila, Durango, San Luis Potosí, Zacatecas, Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Jalisco, entre otros), incluyendo algunos del sur (Guerrero, Oaxaca y Chiapas, principalmente). Como ya se ha mencionado, muchos de los municipios de estos estados tienen características socioeconómicas y ambientales que los hacen particularmente vulnerables, como son: población en condiciones de pobreza, marginación y rezago social; actividad agropecuaria expuesta y sensible a las variaciones del clima porque carece de infraestructura adecuada, de asistencia técnica, de financiamiento y seguros; y deterioro grave de los recursos naturales caracterizado por la deforestación, la degradación del suelo y la sobreexplotación de acuíferos, entre otros. Aunque la gran mayoría de los estados y municipios más vulnerables se ubican en el norte del país y en la altiplanicie mexicana (donde se encuentran las zonas áridas, que por sus características climáticas están más expuestas y son más sensibles a la sequía), lo cierto es que incluso en estados del sur como Guerrero, Oaxaca y Chiapas (que se caracterizan por ser típicamente lluviosos) existen municipios con alto grado de vulnerabilidad social, económica y ambiental ante la sequía, y también son severamente afectados por el fenómeno. Esto tiene incidencia directa en el incremento del riesgo por sequía, es decir, en la mayor probabilidad de que se produzcan daños en las personas y en los ecosistemas como consecuencia de este fenómeno natural.

5.1.3. Mapa nacional de riesgo por sequía

La combinación del peligro y la vulnerabilidad ante la sequía da como resultado el riesgo. Así, en la Figura 5.7 se presenta el mapa nacional de riesgo por sequía. En este mapa se puede observar claramente que los estados de la república mexicana que tienen mayor proporción de municipios con alto y muy alto riesgo por sequía son los del noroeste (Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa) y los de la altiplanicie mexicana (Chihuahua, Durango, Coahuila, Nuevo León, Jalisco, Zacatecas, Michoacán). Como se mencionó anteriormente, estos estados son los que históricamente han sido más afectados por las sequías y en ellos se presenta con mayor frecuencia este fenómeno. Sus condiciones climatológicas predominantes (con climas secos y semisecos extremos) se conjugan con la vulnerabilidad de su población y de las diversas actividades económicas (principalmente la agricultura y la ganadería), para propiciar que de manera recurrente se presenten desastres asociados a la escasez y falta de agua como consecuencia de las sequías severas y prolongadas, tal como sucedió durante la última sequía de 2011-2012, la más severa de los últimos 70 años. Esta sequía generó pérdidas económicas en la producción agrícola que superaron los 16 mil millones de pesos mexicanos –un mil 300 millones de dólares americanos– y se estima que las pérdidas totales en los diferentes sectores económicos equivalieron al 10% del producto interno bruto nacional; se calcula que alrededor de 48 millones de mexicanos pade-

cieron las consecuencias del fenómeno en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, y fue un problema que afectó a dos de cada tres hectáreas cultivadas y ocasionó la muerte de miles de cabezas de ganado (INEGI, 2011).

En México, donde la agricultura y la ganadería son actividades productivas muy importantes desde los puntos de vista económico y social, la vulnerabilidad de los productores –agricultores y ganaderos– implica un alto riesgo ante la presencia de sequías, que con frecuencia han asolado grandes extensiones y propiciado severos desajustes en la economía regional y nacional. La agricultura de temporal depende exclusivamente del agua de lluvia para la producción, por lo que es altamente vulnerable a la sequía meteorológica (déficit de precipitaciones con respecto a los niveles considerados como normales); mientras que la agricultura de riego se abastece de agua mediante pozos, presas, bombeos y derivaciones de ríos, por lo que es más vulnerable a la sequía hidrológica (déficit de caudales superficiales y subterráneos). Dado que el agua es un insumo indispensable en la producción agrícola tanto de riego como de temporal, cuando hay escasez del recurso como consecuencia de una sequía, el déficit hídrico se refleja sensiblemente en bajas en la producción y en el ingreso y nivel de vida de los productores; en la importación y alza de precios en los productos; en la degradación de la infraestructura productiva; etc.

Junto con la agricultura, la actividad ganadera es la que más resiente los efectos de la sequía en el corto, mediano y largo plazos. En la

ganadería el impacto inicial de este fenómeno se percibe en la escasez y falta de agua para abrevadero, en la reducción del forraje disponible y, posteriormente, en la disminución de su producción, misma que se refleja en el peso del ganado, sus tasas de reproducción y en la producción de leche. En muchos casos, las sequías han provocado la muerte del ganado por inanición.

Ahora bien, aunque la gran mayoría de los estados y municipios más vulnerables y que tienen mayor probabilidad y riesgo de sequía se ubican en el norte del país y en la altiplanicie mexicana, es posible observar que incluso en estados del sur como Guerrero, Oaxaca y Chiapas, donde se tienen normal-

mente lluvias abundantes, existen municipios con alto grado de vulnerabilidad global ante la sequía, y también son severamente afectados por el fenómeno, sobre todo en aquéllos años en que ocurre la presencia de El Niño, como sucedió en 2015. En ese año, muchos municipios de Chiapas, Guerrero, Oaxaca y Tabasco, principalmente, fueron declarados en situación de emergencia y desastre por sequía, y sumaron cuantiosas pérdidas en la producción agrícola y pecuaria. Por ejemplo, tan sólo en el estado de Guerrero, la sequía afectó más de 163 mil hectáreas de maíz en 66 municipios de esa entidad federativa; en Chiapas el 49.2% del territorio estatal padeció los efectos de una sequía severa; y en Tabasco (el estado más lluvioso del país) la sequía afectó a 17

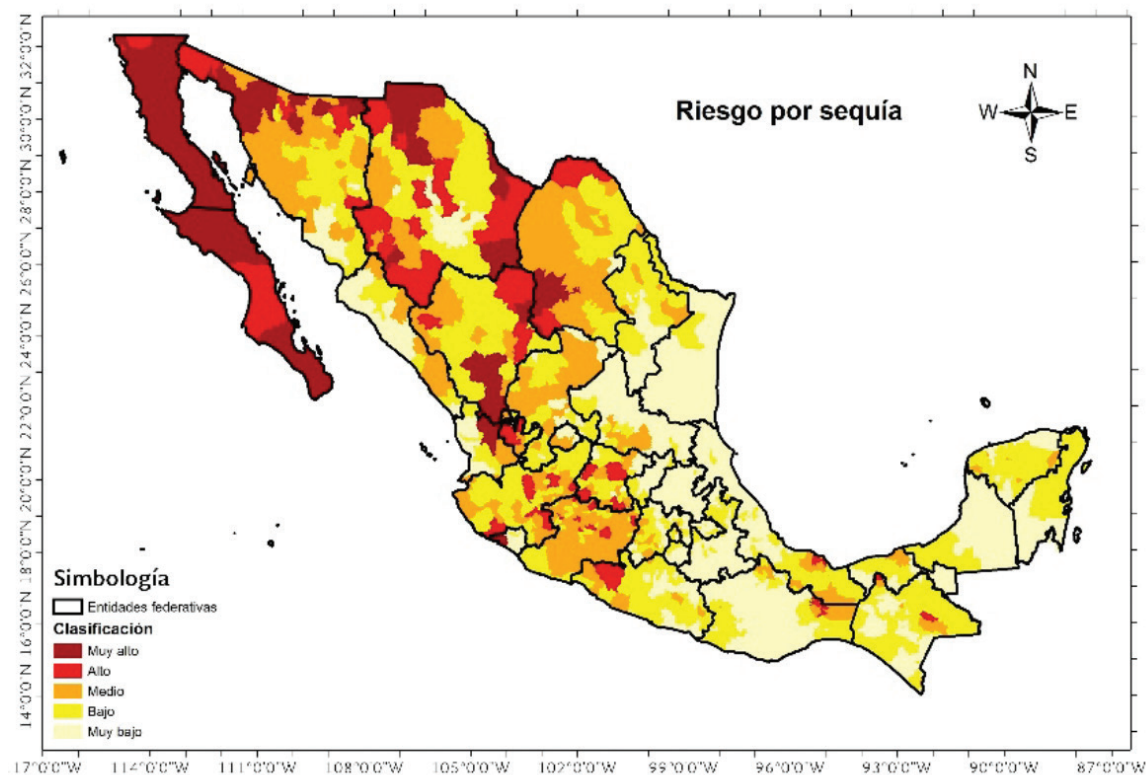


Figura 5.7. Mapa nacional de riesgo por sequía. Fuente: elaboración propia.

municipios provocando pérdidas en 60% de las cosechas de sorgo (El Universal, 2015).

5.5. Conclusiones

Para implementar estrategias adecuadas de respuesta a los efectos negativos del cambio climático, dentro de los cuales se encuentran la mayor frecuencia y severidad de las sequías, es necesario determinar con precisión cuál es la vulnerabilidad, el peligro y el riesgo de que ocurran fenómenos adversos como estos en un lugar determinado. Para ello, hay que tomar en cuenta que existen diversos factores socioeconómicos y ambientales que hacen que la población de un país, estado o municipio sea más o menos vulnerable al aconteci-

miento de un peligro o desastre asociado a un fenómeno natural como puede ser una sequía severa y prolongada. No obstante, no existe un método que sea universalmente aceptado para evaluar y dimensionar el grado de vulnerabilidad de una región a los eventos de déficit hídrico. Por ello, en este artículo se ha presentado un método que permite construir índices municipales y mapas nacionales de peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en México, a partir de un conjunto de indicadores de tipo socioeconómico y ambiental que se combinan mediante un procedimiento analítico objetivo para identificar los estados y municipios más vulnerables desde los puntos de vista social, económico y ambiental, así como aquéllos que presentan mayor probabilidad de ocurrencia y riesgo de sequía. Estos índices y





mapas pueden ser útiles para los tomadores de decisiones y los responsables de formular políticas públicas en varios sentidos, tales como: establecer prioridades en la implementación de medidas de prevención y mitigación; entender dónde y cómo mejorar las capacidades de adaptación; entender dónde y cómo disminuir la exposición y la sensibilidad; y, en última instancia, optimizar la distribución de recursos de los diversos programas gubernamentales orientados al desarrollo social, los cuales contribuyen al fortalecimiento de capacidades para hacer frente a los fenómenos hidrometeorológicos extremos y a la adaptación al cambio climático.

5.6. Referencias

- Birkmann J. (2007) Risk and vulnerability indicators at different scales: applicability, usefulness and policy implications, *Environmental Hazards* 7, 20-31.
- Cardona A., O. D. (2007). Indicadores de riesgo de desastre y gestión de riesgos: programa para América Latina y el Caribe. Informe Resumido. Banco Interamericano de Desarrollo. Washington, D. C.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2012). Análisis de las regiones más vulnerables ante las sequías en México. SEMARNAT. México, D.F.

- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2017). Estadísticas del agua en México. SEMARNAT. Ciudad de México.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). (2014). *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México*. Secretaría de Gobernación, México, D.F. 225 pp.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y El Caribe). (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*, 25 y 26 de marzo de 2000, Nueva Orleans, 47 pp.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2015). Ley General de Cambio Climático (LGCC). Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Consultada el 12 de junio de 2018 desde: <http://www.dof.gob.mx/>
- EL Universal (2015). Por la sequía, todo se está acabando [En línea]. Consultado el 13 de septiembre de 2016 desde: <http://www.eluniversal.com.mx/articulo/estados/2015/08/30/por-la-sequia-todo-se-esta-acabando>
- Florescano, E. (2000). *Breve historia de la sequía en México*, 2a Ed., CONACULTA, México, D.F. 252 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO/UNEP, Geneva, 103 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. By: 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.) Cambridge University Press, 582 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2013). *Climate Change 2013. The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC, WMO/UNEP, Geneva, 27 pp.
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2016). Escenarios de cambio climático. [En línea] Consultado el 10 de enero de 2018 desde: <http://escenarios.inecc.gob.mx/>.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2018). Marco Geoestadístico Nacional. [En línea] Consultado el 15 de marzo de 2018 desde: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/m_geoestadistico.aspx
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2011). Estadísticas a propósito del día mundial contra la desertificación y la sequía, http://www.inegi.gob.mx/contenido/GeografiaMedioAmbiente/INEGI_Diamundialcontraladesertificacionylasequia.pdf (accessed 15th June 2015).
- Iyengar, N. S. & P. Sudarshan (1982). "A Method of Classifying Regions from Multivariate Data". *Economic and Political Weekly*,



- Vol. 17, Núm. 51, Dec. 1982, pp. 2048-52.
- Landa, R., Magaña, V. y Neri, C. (2008). *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 133 pp.
- Magaña, V. (2013). *Guía metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad ante cambio climático*. Instituto Nacional de Ecología y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. México, D.F. 61 pp.
- Moreno P. (2004). *Nubes ausentes: las sequías*. Editorial Planeta Mexicana. México, D.F.
- Ortega-Gaucin, D. (2013). Sequía: causas y efectos de un fenómeno global, *Ciencia UANL*, 16(61), pp. 8-15.
- Ortega-Gaucin, D., Castellano B., H. V. y de la Cruz B., J. (2017). Economic, social and environmental vulnerability to drought in the Northwest River Basin System, Mexico. *Int. Journal of Environmental Impacts*, 1(3): 240-253.
- Soares D., Romero R. & López R. (2015) Conceptualización de vulnerabilidad y construcción de un índice de vulnerabilidad social, In: *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*, F. I. Arreguín C. (coord.), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, México, pp. 11-16.
- Stathatou P. M., Kampragou E., Grigoropoulou H. & Assimacopoulos D. (2014) Vulnerability of water systems: a comprehensive framework for its assessment and identification of adaptation strategies, *Proc. Adapt to Climate Intern. Conf.*, Nicosia, 27-28 March.
- Wilches-Chaux G. (1993). La vulnerabilidad global, In: *Los desastres no son naturales*, A. Maskrey (comp.), Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, Puerto Limón, Costa Rica, pp. 11-44.
- Wilhite D. A. (2011). Drought, In: *Encyclopedia of Water Science*, 2nd ed., Taylor & Francis, New York, pp. 215-217.