



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
HIDRÁULICA

ÍNDICES DE VULNERABILIDAD A LA SEQUÍA EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ERNESTO GARCÍA RUGERIO

TUTOR PRINCIPAL
DR. FELIPE I. ARREGUÍN CORTÉS
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

MÉXICO, D.F. ENERO 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Carlos A. Escalante Sandoval.

Secretario: Dr. Israel Velasco Velasco.

Vocal: Dr. Felipe I. Arreguín Cortés.

1 er. Suplente: M. en I. Juan Carlos Valencia Vargas.

2 d o. Suplente: M. en I. Horacio Rubio Gutiérrez.

Lugar donde se realizó la tesis: JIUTEPEC, MORELOS.

TUTOR DE TESIS:

DR. FELIPE I. ARREGUÍN CORTÉS

FIRMA

DEDICATORIA

Este trabajo este dedicado enteramente a la Sra. Mercedes Rugerío Loaíza, quien me enseñó la importancia de la constancia, trabajo duro y a dar lo mejor de mí.

Gracias por todas sus enseñanzas, apoyo, comprensión y por cada uno de sus regaños.

Gracias Mamá.

Agradecimientos.

A los miembros de la familia García Rugerío por todo el apoyo que me han brindado a lo largo de mi vida, y cada una de sus enseñanzas. Gracias por crecer juntos y enseñarme el valor de la familia.

A cada una de las personas que me tendieron la mano a mi llegada a Morelos. Gracias por mostrarme el valor de la amistad y del apoyo incondicional.

Gracias a la Ing. Norma Arlette Velasco por ser un soporte en mi vida. Por su compañía, cariño y su amistad. Y sobre todo por su paciencia.

Agradecimiento especial.

Al Dr. Israel Velasco Velasco por cada uno de sus consejos y su paciencia en las consultas realizadas.

Un agradecimiento especial al M. Doroteo Treviño Puente, por su interés y apoyo en la realización del presente trabajo.

Al Dr. Felipe I. Arreguín Cortés y al M. Horacio Rubio Gutiérrez por el tiempo invertido en la revisión de la presente tesis.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 ESTADO DEL ARTE.....	1
1.2 MARCO NORMATIVO.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.	4
2. ASPECTOS RELEVANTES DE LA SEQUÍA.....	5
2.1 DEFINICIONES Y TIPOS DE SEQUÍAS.....	5
2.2 CAUSA DE LAS SEQUÍAS.	9
2.3 CONSECUENCIAS DE LA SEQUÍA.	19
2.4 SEQUÍAS HISTÓRICAS EN MÉXICO Y EN EL MUNDO.....	20
3. MEDICIÓN, SEGUIMIENTO Y MONITOREO DE LA SEQUÍA.	26
3.1 INFORMACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN LA REGIÓN.....	26
3.2 ÍNDICES DE SEQUÍA EXISTENTES.....	31
3.3 MONITORES DE SEQUÍA.	34
3.4 BIOÍNDICADORES DE SEQUÍA.	42
4. MEDIO FÍSICO Y ESTADÍSTICAS EN LA REGIÓN.....	45
4.1 MEDIO FÍSICO.	47
4.2 DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA CUENCA.....	51
4.3 EFECTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA REGIÓN.....	52
4.4 CALIDAD DEL AGUA.	54
4.5 USOS DEL AGUA.....	57
4.5.1 USO CONSUNTIVO	57
4.5.2 USO NO CONSUNTIVO	64
4.6 MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES.	65
4.7 BALANCES HÍDRICOS.....	68
4.7.1 AGUA SUPERFICIAL.....	68
4.7.1 AGUA SUBTERRÁNEA.....	69
4.8 EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS.	71
4.9 EVALUACIÓN DE LAS PRINCIPALES PROBLEMÁTICAS.....	74
5. CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA EN LA REGIÓN.	75
5.1 ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTÁNDAR (SPI).	76
5.2 ÍNDICE DE SEQUÍA EN CORRIENTES (SDI).	97

5.3 CONCLUSIONES DE COMPARACIONES ENTRE SPI Y SDI.....	104
6. OBTENCIÓN DE ÍNDICES DE VULNERABILIDAD.....	105
6.1 METODOLOGÍAS DE INTEGRACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	107
6.2 AGRUPACIÓN DE ELEMENTOS PARA OBTENCIÓN DE VULNERABILIDADES.....	109
6.3 ASIGNACIÓN DE PESOS A LAS VARIABLES ANALIZADAS.....	122
6.4 OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD A LA SEQUÍA.....	130
7. CONCLUSIONES DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	136
8. RECOMENDACIONES.....	138
REFERENCIAS.....	140

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Diagrama de objetivos del PRONACOSE.....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2 Clasificación de las definiciones de sequía de acuerdo a su objetivo y categorías.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 3 Desfase temporal en la propagación de anomalías pluviométricas hacia los diversos niveles del ciclo hidrológico.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura4. Clasificación de las causas de sequía de acuerdo a su origen.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 5. Espesores y temperaturas en las capas de la atmósfera terrestre.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 6. Método simplificado de la circulación general del aire.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 7. Proceso de formación de las masas de aire.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura8 La superficie solar y sus manchas, algunas llegan a ser tan grandes como el planeta Júpiter.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura9. Eyección de plasma sobre la atmósfera terrestre.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 10. Condiciones normales del clima.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura11. Condiciones del clima con Niño.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura12. Condiciones del clima con Niña.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura13. Temperatura del océano con el Niño y La Niña.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura14. Movimiento de precesión de la tierra.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura15. Víctimas humanas y pérdidas económicas por desastres naturales en el mundo.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 16. Regiones afectadas por la sequía a junio de 2011.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura17 Distribución de la red convencional en la RHA VI.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura18 Distribución de la red automática en la RHA VI.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura19 Incremento del número de estaciones a la red Convencional por década en la RHA VI.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura20 Acumulado histórico del número de estaciones en la red Convencional en la RHA VI.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura21 Incremento del número de estaciones a la red automática por década en la RHA VI.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura22 Acumulado del número de estaciones en la red automática en la RHA VI.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 23 Interface del Global Drought Monitor.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura24 Grados de severidad del Monitor de Sequía Global.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura25 SPI calculado para el NADM.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 26 Índice de severidad de Palmer calculado para el NADM.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 27 Porcentaje de precipitación normal calculado para el NADM.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura28 Índice satelital de salud de la vegetación.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura29 Modelo de humedad del suelo Leaky.....</i>	<i>38</i>

<i>Figura30 Anomalía de lluvias a 1 y 3 meses.</i>	38
<i>Figura31 Mapa de estado de llenado de presas GASIR.</i>	39
<i>Figura32 Cruce de información mediante la plataforma GIS para obtención de mapas del NADM.</i>	39
<i>Figura33 Consenso y obtención de mapas del NADM.</i>	39
<i>Figura34 Grados de severidad del NADM.</i>	40
<i>Figura35 Visor del European Drought Observatory.</i>	41
<i>Figura36 Atlas de sequía de América del Norte, reconstrucción de sequías mediante anillos de árboles.</i>	42
<i>Figura37 Lecturas de datos del clima en anillos de árboles.</i>	42
<i>Figura38 Evaluación del Índice de severidad de sequía de Palmer para la Est. 164.</i>	43
<i>Figura39 Mapa de reconstrucción climática mediante el índice de severidad de sequía de Palmer para el año 1808.</i>	43
<i>Figura40 Zona de estudio de sequía. RHA VI</i>	45
<i>Figura41 Distribución de agua superficial proveniente del río Bravo entre México y EUA</i>	46
<i>Figura42 Descripción topográfica de la RHA VI.</i>	47
<i>Figura43 Climas predominantes de la RHA VI.</i>	47
<i>Figura44 Condiciones de humedad de la RHA VI.</i>	47
<i>Figura 45 Uso del suelo de la RHA VI.</i>	48
<i>Figura 46 Tipos de suelos de la RHA VI.</i>	48
<i>Figura47 Isoyetas medias históricas para la RHA VI.</i>	49
<i>Figura48 Precipitación pluvial anual histórica y media en la RHA VI.</i>	49
<i>Figura49 Temperatura observada media anual en la RHA VI.</i>	50
<i>Figura50 Temperatura máxima media anual en la RHA VI.</i>	50
<i>Figura51 Evaporación acumulada media anual en la RHA VI.</i>	50
<i>Figura52 Distribución porcentual del agua en la RHA VI.</i>	51
<i>Figura53 Calidad del agua según DBO₅ en la RHA VI.</i>	55
<i>Figura54 Calidad del agua según DQO en la RHA VI.</i>	55
<i>Figura55 Calidad del agua según SST en la RHA VI.</i>	56
<i>Figura56 Usos consuntivos del agua en México.</i>	57
<i>Figura57 Distribución de los usos consuntivos del agua en México.</i>	58
<i>Figura58 Fuentes predominante de abastecimiento de agua en México.</i>	58
<i>Figura59 Tipos de cultivos y de riego en la RHA VI.</i>	60
<i>Figura60 Cobertura de agua potable y alcantarillado en la población en la región hidrológica VI Río Bravo.</i>	61
<i>Figura61 Número de plantas potabilizadoras en operación por RHA.</i>	62
<i>Figura62 Capacidad instalada y caudales potabilizados (m³/s) por RHA.</i>	62
<i>Figura63 Número de plantas de tratamiento de aguas residuales por RHA.</i>	63
<i>Figura64 Capacidad instalada y caudales saneados (m³/s) por RHA.</i>	63
<i>Figura65 Volúmenes de agua para producción de energía hidroeléctrica para RHA VI.</i>	64
<i>Figura66 Capacidad instalada para producción de energía eléctrica por tipo de fuente para la RHA VI.</i>	64
<i>Figura67 Disponibilidad de agua superficial en la RHA VI.</i>	69
<i>Figura68 Disponibilidad de agua subterránea en la RHA VI.</i>	70
<i>Figura69 Acciones de gestión del agua para mitigar efectos de las sequías.</i>	71
<i>Figura70 Comportamiento de la sequía para los años 2010-2013 la RHA VI.</i>	72
<i>Figura71 Principales ciclones de 1970 a 2010 en la RHA VI.</i>	73
<i>Figura 72 Ejemplo de la transformación de equiprobabilidad de la distribución Gamma ajustada a la distribución normal estandar</i>	76

Figura73 Ejemplo de análisis para obtención de SPI.	78
Figura74 Estaciones climatológicas utilizadas para obtención de SPI.....	79
Figura75 Gráfica de comportamiento del SPI para diversos periodos de tiempo para la estación Jiménez Puente, Chihuahua.	84
Figura76 Zona de mayor número de sequías de acuerdo al SPI 1 mes en el periodo (1980-2012).	84
Figura77 Número y distribución de eventos de sequías según SPI para una duración de 1 mes (1980-2012).....	85
Figura78 Número de eventos de sequías según SPI para una duración de 3 meses (1980-2012).....	86
Figura79 Número de eventos de sequías según SPI para una duración de 6 meses (1980-2012).....	86
Figura80 Número de eventos de sequías según SPI para una duración de 9 meses (1980-2012).....	87
Figura81 Número de eventos de sequías según SPI para una duración de 12 meses (1980-2012).....	87
Figura82 Número de eventos de sequías según SPI para una duración de 24 meses (1980-2012).....	88
Figura83 Recurrencia de meses con sequía según SPI de 1 mes para el periodo (1980-2012).	88
Figura84 Recurrencia de meses con sequía según SPI de 3 meses para el periodo (1980-2012).....	89
Figura85 Isoyetas medias históricas para la RHA VI.....	89
Figura86 Mapas de valores máximos históricos de sequía según SPI para el periodo (1980-2012).....	90
Figura87 Mapas de número de eventos y tipo de sequía según SPI para el periodo (1980-2012).	91
Figura88 Meses con sequía y tipo por estado según SPI 6 meses para el periodo (1980-2012).....	93
Figura89 Años con presencia del fenómeno del Niño y Niña.	94
Figura90 Variación del promedio mensual del total de área de manchas solares históricas.....	95
Figura91 Comparación de años de sequía según el SPI ₆ con los años con manchas solares.	96
Figura92 Comparación de años con sequía según el SPI ₆ con el índice ONI.....	96
Figura93 Presas de análisis dentro de la RHA VI río Bravo.	98
Figura94 Cuencas de las presas con información 1980-2013 en la RHA VI río Bravo.	99
Figura95 Gráfico de comportamiento del SDI histórico para la presa La Boca periodo 1980-2012.	100
Figura96 Recurrencia de años con sequía en presas de acuerdo al SDI 1980-2012.	101
Figura97 Valor mínimo de sequía en presas de acuerdo al SDI 1980-2012.	102
Figura98 Ciclo de la prevención.	105
Figura99 Integración de la vulnerabilidad.....	108
Figura100 Relación entre componentes del índice de vulnerabilidad a la sequía y aspectos de sequía.	109
Figura101 Integración de Índice de vulnerabilidad a la sequía Global.....	110
Figura102 Integración de Índice de vulnerabilidad a la sequía ambiental.....	110
Figura103 Integración de Índice de vulnerabilidad a la sequía económica.....	111
Figura104 Integración de Índice de vulnerabilidad a la sequía social.	111
Figura105 Disponibilidad de agua superficial en la región.	111
Figura106 Disponibilidad de agua subterránea en la región.	112
Figura107 Agua con uso consuntivo en la región.....	113
Figura108 Distribución del PIB en la RHA VI.....	113
Figura109 Zonas de preservación natural en la región.	115
Figura110 Clasificación del objetivo ambiental de las cuencas.	116
Figura111 Distribución del caudal ecológico de las cuencas.....	116
Figura112 Estaciones con información del recurso hídrico.	117
Figura113 Zonas estandarizadas con mayor intensidad de sequía de acuerdo al SPI ₆	119
Figura114 Zonas estandarizadas con mayor duración de sequía de acuerdo al SPI ₆	119
Figura115 Zonas estandarizadas con mayor persistencia de sequía de acuerdo al SPI ₆	120
Figura116 Presas en la región con sus capacidades de almacenamiento al NAMO.....	120

<i>Figura117 Mapa de marginación social en la región.</i>	121
<i>Figura118 Ejemplo de la Jerarquía utilizada en el proceso AHP para la integración de índices.</i>	123
<i>Figura119 Encuesta aplicada para la integración de índices.</i>	126
<i>Figura120 Comparación de resultados de la asignación de pesos mediante AHP y ANP.</i>	129
<i>Figura121 Integración de la vulnerabilidad ambiental.</i>	130
<i>Figura122 Integración de la vulnerabilidad económica.</i>	131
<i>Figura123 Integración de la vulnerabilidad social.</i>	131
<i>Figura124 Integración de la vulnerabilidad global.</i>	131
<i>Figura125 Vulnerabilidad ambiental en la RHA VI</i>	132
<i>Figura126 Vulnerabilidad económica en la RHA VI</i>	133
<i>Figura125 Vulnerabilidad social en la RHA VI.</i>	134
<i>Figura125 Vulnerabilidad global en la RHA VI.</i>	135

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Estado del arte en el tema Índices de Vulnerabilidad a la sequía.</i>	2
<i>Tabla 2 Cronología de sequías en el México Prehispánico.</i>	22
<i>Tabla 3 Cronología de sequías en el México Colonial.</i>	23
<i>Tabla 4 Cronología de sequías en el México Independiente.</i>	24
<i>Tabla 5 Estaciones existentes en la RHA VI pertenecientes a la red convencional.</i>	27
<i>Tabla 6 Estaciones existentes en la RHA VI pertenecientes a la red automática.</i>	27
<i>Tabla 7 Índices de sequías existentes en el mundo.</i>	31
<i>Tabla 8 Variables y tipo de sequía analizada de cada uno de los índices existentes.</i>	31
<i>Tabla 9 Balance general hídrico de los procesos hidrológicos en la RHA VI Río Bravo.</i>	51
<i>Tabla 10 Tipos de vulnerabilidad al cambio climático en RHA VI.</i>	53
<i>Tabla 11 Distribución porcentual de los sitios monitoreados mediante diversos parámetros en la RHA VI.</i>	55
<i>Tabla 12 Calidad del agua marina en playas de la RHA VI.</i>	56
<i>Tabla 13 Principales aportaciones al PIB 2010 por sector de los estados que integran la RHA VI.</i>	58
<i>Tabla 14 Distritos de riego en la región hidrológico administrativa VI.</i>	59
<i>Tabla 15 Unidades de riego en la región hidrológico administrativa VI.</i>	59
<i>Tabla 16 Porcentaje de cobertura de agua potable Región Hidrológico Administrativa VI.</i>	61
<i>Tabla 17 Porcentaje de cobertura de drenaje en la Región Hidrológico Administrativa VI.</i>	61
<i>Tabla 18 Clasificación del SPI por categorías y su probabilidad de ocurrencia.</i>	77
<i>Tabla 19 Estaciones climatológicas utilizadas para obtención de SPI.</i>	79
<i>Tabla 20 Sequías históricas en la RHA VI, periodo 1980-2012.</i>	93
<i>Tabla 21 Definición de los estados de sequía hidrológica mediante el SDI.</i>	97
<i>Tabla 22 Definición de los estados de sequía hidrológica mediante el SDI.</i>	103
<i>Tabla 23 Valores de SDI Octubre - Septiembre para el periodo 1979-2012.</i>	103
<i>Tabla 24 Resultados de la asignación de pesos mediante el AHP.</i>	127
<i>Tabla 25 Asignación de pesos a la decisión de especialistas para el análisis del ANP.</i>	128
<i>Tabla 26 Comparación de resultados de la asignación de pesos mediante AHP y ANP.</i>	129

1. INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO.

La sequía es un fenómeno meteorológico caracterizado por la disminución de la cantidad de agua presente en la atmósfera, en el suelo y en los cauces. Este fenómeno está presente desde los principios de la historia de la humanidad y ha sido factor clave en la desaparición de grandes civilizaciones, así como un motor de movimientos sociales que han impactado en todo el mundo.

La importancia de conocer el fenómeno, sus características, desarrollo y gravedad es vital para afrontar de manera anticipada sus adversidades y no perecer ante la severidad del mismo.

La sequía es un fenómeno natural peligroso para el ser humano debido a su desarrollo silencioso, impredecible y que no se puede conocer su duración ni su alcance. De lo anterior surge la necesidad de saber que tanta es la vulnerabilidad de los diversos sistemas económicos, sociales y ambientales de una sociedad al ser impactados por una sequía.

Las pérdidas humanas y económicas que genera la sequía se debe a que en la mayoría de los casos la población no cuenta con los sistemas estructurales, culturales, políticos, económicos y sociales adecuados que les permitan manejar la adversidad de este tipo de fenómenos y de esta manera mitigar sus efectos.

Por todo lo anterior la importancia de identificar las zonas más vulnerables a los efectos adversos de la sequía es el primer paso para hacer frente a este fenómeno natural. Asimismo entender en que parte los sistemas existentes son vulnerables a fallar ante la presencia del fenómeno ayudará a disminuir la incertidumbre de dicha falla y a planear estrategias en los diferentes campos de acción que se requiera para evitar pérdidas humanas y económicas, o que se generen movimientos sociales que agraven la problemática.

Sensibilidad, capacidad de adaptación y grado de exposición serán palabras clave en la obtención de la vulnerabilidad a la sequía.

En esta primera parte se plantean algunas de las diversas definiciones que existen del fenómeno, sus características y su origen, así como las consecuencias de sequías históricas en México y el Mundo.

1.1 ESTADO DEL ARTE

Los conocimientos alcanzados en el tema de sequías desde la última mitad del siglo XX han sido importantes, pues se han desarrollado un sinnúmero de índices que ayudan a

medir la intensidad, frecuencia, duración y alcance de las sequías en varias partes del mundo.

Sin embargo en el tema específico de *vulnerabilidad ante los efectos de una sequía* los estudios han sido pocos, y no se ha alcanzado a concertar una metodología que sea totalmente válida para la obtención de estos índices.

A lo largo del mundo se han publicado trabajos e investigaciones que hablan acerca del término vulnerabilidad, algunos trabajos que abordan diversas metodologías propuestas como se mencionan en la Tabla 1.

Tabla 1 Estado del arte en el tema Índices de Vulnerabilidad a la sequía.

Título	País	Año	Autor
Mapas de índices de riesgo a escala municipal por Fenómenos Hidrometeorológicos.	México	2012	Cenapred
Vulnerabilidad a la sequía en Henan, estudio de evaluación de Riesgos.	China	2012	Li Yan, Instructor: Ma Xi-xia
Drought Vulnerability Index	Europa	2010	Agricultural University of Athens Hellas.
Developing a Synthetic Index of Land Vulnerability to Drought and Desertification.	Italia	2010	Salvati, luca1 Zitti, marco2
Vulnerabilidad a la sequía en la cuenca del Guadalquivir.	España	2010	Universidad Politécnica de Madrid
Studies on assessment of vulnerability to drought	India	2009	National Institute of Hydrology

Título	País	Año	Autor
Spatio-Temporal Analysis of Drought Vulnerability using the Standardized Precipitation Index (Case study: Semnan Province, Iran).	Irán	2008	Reyhhan, M. Karimpour ¹
Vulnerabilidad y respuestas a desastres: análisis. Comparativos de estrategias para la mitigación de sequías	Canadá	1998	(SSHRC), Ottawa, Canadá

Fuente: Elaboración propia.

1.2 MARCO NORMATIVO.

Actualmente en México no se cuenta con un marco normativo que ayude a generar planes de manejo y diseño de estructuras que mitiguen el efecto de sequías en la República Mexicana.

La Comisión Nacional del Agua a través del Programa Nacional contra la Sequía (PRONACOSE) el cual consiste en la atención, seguimiento, mitigación y prevención al fenómeno recurrente de la sequía en el territorio nacional planea la atención a esta problemática.

El programa consiste en dos componentes, como se puede apreciar en la *Figura 1*:

- Elaborar los programas de medidas para prevenir y enfrentar la sequía a nivel cuenca o grupos de cuenca.
- Ejecución de acciones para mitigar sequías existentes

Con relación al primer componente:

a) Monitoreo.- Desarrollar los indicadores de la condición de la sequía; y publicarlos en la página Internet de la Conagua.

b) Programas de medidas para prevenir y enfrentar la sequía a nivel cuenca o grupos de cuenca.- Para cada uno de los 26 Consejos de Cuenca se elaborará su Programa de medidas para prevenir y mitigar la sequía a nivel cuenca y los programas para los usuarios de las aguas nacionales. La Conagua brindará apoyo a través de sus 13 Organismos de Cuenca.

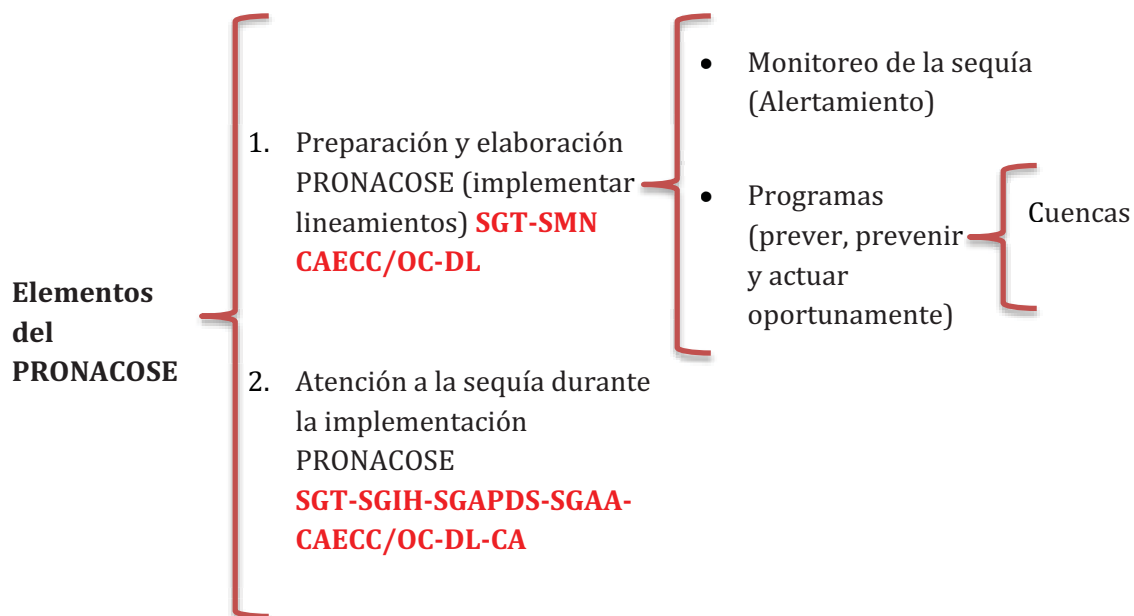


Figura 1 Diagrama de objetivos del PRONACOSE.

Fuente: (CONAGUA, 2013)

Con respecto al segundo componente se pretende crear dos Comités:

i) Comisión Intersecretarial para la atención a la sequía, conformado por Presidencia, CONAGUA, CONAFOR, ECONOMÍA, EDUCACIÓN, ENERGÍA, SAGARPA, SALUD, SEDENA, SEDESOL, SEGOB, TURISMO; y

ii) Comité de Expertos.

El primer Comité dará seguimiento a las acciones que realicen todas las dependencias del Gobierno Federal ante la eventual ocurrencia de una sequía. Se buscará la convergencia de programas institucionales federales existentes para atención de sequías en las dependencias mencionadas. El segundo Comité tendrá la función de evaluar el avance del Programa Nacional contra la sequía y emitir recomendaciones.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.

Los impactos por sequía han generado pérdidas económicas y humanas en diversas partes de México. Las pérdidas económicas a pesar de no ser estructurales impactan no sólo en el ámbito agropecuario, sino también existen grandes pérdidas en la industria, comercio y servicios, lo cual da lugar a alteraciones del funcionamiento de los sistemas establecidos para garantizar la estabilidad y prosperidad de una sociedad.

En la presente investigación se estudia no sólo el comportamiento de la sequía en la Región Hidrológica Administrativa VI Río Bravo, si no que se propone una metodología de análisis para la obtención de vulnerabilidad a la misma.

La vulnerabilidad de una región se puede presentar en aspectos económicos, sociales y ambientales que, al depender unos de otros, la presencia de vulnerabilidad en alguno de los elementos podría provocar el inicio de un círculo vicioso que afectaría los 3 componentes por la interrelación que presentan lo que agravaría las consecuencias de una sequía.

Por lo anterior se pretende reconocer las principales problemáticas en la región y determinar su grado de vulnerabilidad en la parte ambiental, económica y social con la intención de que sirva como un antecedente para proponer las medidas que sean pertinentes para mitigar los efectos adversos de una sequía.

2. ASPECTOS RELEVANTES DE LA SEQUÍA.

La sequía es un rasgo normal y recurrente del clima, aunque mucha gente erróneamente lo considere un acontecimiento extraño. Ocurre en prácticamente todas las zonas climáticas, pero sus características varían considerablemente de una región a otra. (García A. , 2006)

2.1 DEFINICIONES Y TIPOS DE SEQUÍAS.

Existen infinidad de definiciones para el fenómeno de las sequía, en función del enfoque disciplinar de quien lo hace. Para entender esto, se puede realizar una clasificación de las definiciones de acuerdo a sus objetivos y categorías como se muestra en la *Figura 2*.



Figura 2 Clasificación de las definiciones de sequía de acuerdo a su objetivo y categorías.

Fuente: (García A. , 2006).

Definiciones conceptuales.

Las definiciones conceptuales de Sequía, formuladas en términos o condiciones generales, buscan describir el evento y sus características, se trata de definiciones que ayudan a la gente a entender el concepto de Sequía.

Las definiciones conceptuales son importantes en el establecimiento de la política y medidas a tomar en una situación de sequía. Por ejemplo, la política de sequía Australiana incorpora un entendimiento de variabilidad de clima normal en su definición de sequía. El país proporciona ayuda financiera a granjeros sólo bajo "circunstancias de sequía excepcionales". Cuando las condiciones de sequía están más allá de los que podría ser considerado "normal".

Las declaraciones de sequía excepcional están basadas en evaluaciones realizadas por científicos y técnicos, de tal modo que la gente entiende cuando se está produciendo una situación "normal" o una situación "excepcional".

Definiciones operacionales.

Las definiciones operacionales de sequía ayudan a la gente a identificar el principio, el final y el grado de severidad de una sequía. Es decir pretenden obtener resultados cuantitativos.

Para determinar la situación de la sequía, las definiciones operacionales especifican el grado de desviación sobre el promedio de precipitación o alguna otra variable climática definida para un cierto periodo de tiempo.

Es decir, se obtiene el inicio de un periodo de sequía comparando la situación actual con el correspondiente al promedio histórico, basado en una serie climática de no menos de 30 años. El umbral identificado como el principio de una sequía (por ejemplo el 75% de precipitación media para ese periodo de tiempo especificado) por lo general está establecido de forma más arbitraria que sobre la base de su relación exacta con unos ciertos impactos específicos.

Definición como una cantidad absoluta de recurso.

En ocasiones, la situación de sequía se ha definido, cuando, una cierta cantidad de recursos (precipitación, caudales en estaciones de aforo o humedad del suelo) son inferiores a un cierto valor absoluto, fijado para cada zona en concreto.

Si el recurso estudiado está por debajo del umbral, hay situación de sequía. La fijación del umbral determina completamente la utilidad de este grupo de definiciones.

Definición como una desviación del promedio de un recurso.

Al igual que hacían las definiciones operacionales, a partir de una serie de no menos de 30 años, se promedia el recurso estudiado. Sobre este, situaciones en las que se aleja del promedio más de una cierta cantidad umbral, se está en situación de sequía.

Definición como una falta de recurso.

Otra categoría dentro de las definiciones de sequía, nos define esta situación como aquella en la que se produce una falta de recurso para el abastecimiento de las necesidades. Se trata pues de una definición totalmente subjetiva pues en ella la situación de sequía se producirá por la mencionada variabilidad normal del clima como por el grado de utilización de los recursos. Dado que en los sistemas de abastecimiento reales en los que el hombre se inclina como usuario, el grado de utilización de los recursos es uno de los principales causantes de situaciones de sequía. Se trata del grupo de definiciones que más se ajusta a la realidad.

Observando las definiciones anteriores, se observa como reflejan diferencias que pueden provenir de las distintas regiones en donde se formulan así como de las distintas necesidades según el enfoque disciplinar.

Con base en las definiciones anteriores y resultado de consultar una amplia gama de definiciones se propone a continuación la siguiente definición.

Sequía: Es la disminución de los valores medios de precipitación o escurrimiento natural que provoca la incapacidad de abastecimiento normal de los sistemas humano y ambiental.

Wilhite y Glantz (1985) clasificaron el estudio de la sequía en cinco tipos básicos de enfoque multidisciplinar, o simplemente, tipos de sequías:

- a. **Meteorológica**
- b. **Hidrológica**
- c. **Agrícola**
- d. **Operativa**
- e. **Socioeconómica**

Los tres primeros tipos se ocupan de medir la sequía como un fenómeno físico, que se produce en un sistema con regulación natural. El cuarto, hace referencia al estudio del fenómeno desde el punto de vista de un abastecimiento de recursos hídricos en una cuenca con cierto nivel de regulación. El último se ocupa de la sequía en términos de oferta y demanda, investigando cuales son las consecuencias del déficit de agua y como estos afectan a los sistemas socioeconómicos.

a. Sequía Meteorológica.

La sequía meteorológica se define por lo general sobre la base del grado de disponibilidad de agua atmosférica, principalmente precipitación. Se puede plantear dependiendo del índice de medición utilizado, sobre una cantidad absoluta de recurso o sobre la desviación con respecto a la cantidad media de lluvia.

Para regímenes pluviométricos mucho más estacionales, la definición de sequía meteorológica debe hacerse sobre la base de una desviación de la precipitación respecto a la media de las mismas.

b. Sequía Hidrológica

Un periodo de tiempo anormalmente seco, lo bastante prolongado para dar lugar a una escasez de agua, que se refleja en la disminución, inferior a lo normal, de los niveles de escorrentía y los lagos, y/o en la poca humedad del suelo y en el descenso de los niveles de agua subterránea, dicho proceso se puede apreciar en la Figura 3.

Este tipo de sequía afecta a los usos que dependen del nivel de agua de los ríos y embalses, como es la energía hidroeléctrica, los usos recreativos, los ecosistemas y la industria. Esta sequía suele notarse normalmente después de la meteorológica.

c. Sequía agrícola

Ocurre cuando no hay suficiente agua para que puedan crecer los cultivos. Esta sequía no depende sólo de la cantidad de agua que haya o que llueva, también depende de cómo se use el agua ya sea bien o mal. Si existe una sequía y se están regando los cultivos sin ningún cuidado, entonces el problema es mucho mayor.

La sequía agrícola se nota después de la sequía meteorológica (cuando disminuye la precipitación), pero antes de la sequía hidrológica (cuando descienden los niveles de agua en ríos, lagos y embalses).

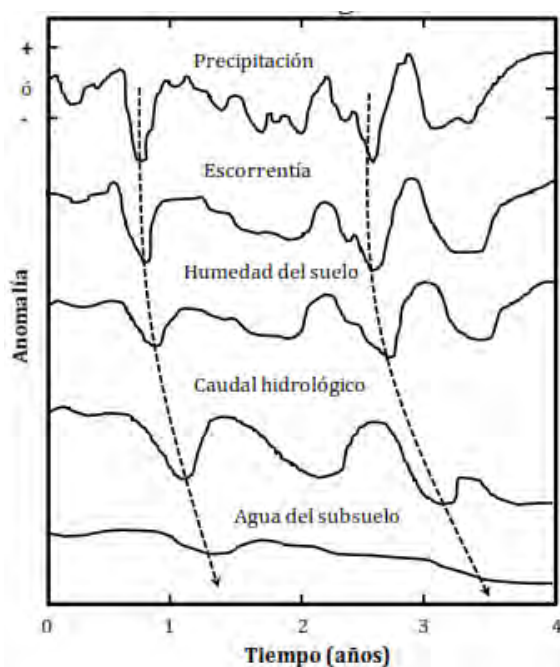


Figura 3 Desfase temporal en la propagación de anomalías pluviométricas hacia los diversos niveles del ciclo hidrológico.

Fuente: (Ortega - Gaucín, 2012).

d. Sequía Operativa

Los sistemas hídricos de abastecimiento, generalmente suelen ubicarse sobre cuencas que se denominan desarrolladas. Es decir, cuencas en las que existen mecanismos de regulación (trasporte, almacenamiento superficial y extracción de aguas subterráneas) de forma que el aprovechamiento de los recursos disponibles sea el máximo posible y por lo tanto cercano al valor medio de los recursos renovables.

En estos casos, los años en los que las aportaciones superan a la demanda, de valor más o menos constante, (o con una cierta tendencia pero suave), el agua es almacenada. Los años en los que la demanda superan a los recursos, se recurre al volumen almacenado.

De esta forma, se denomina fallo, a aquella situación en la cual el sistema no puede abastecer una demanda y se dice que se produce una sequía operativa siempre que exista una situación de fallo del sistema.

En general el origen de la sequía operativa será una sequía hidrológica con una magnitud, duración e intensidad superior a lo normal, pero en ocasiones también puede deberse a una mala operación en el uso de los recursos del sistema.

e. Sequía Socioeconómica

Las definiciones socioeconómicas de sequía asocian la oferta y demanda de algún bien económico con los elementos de sequía meteorológica, hidrológica o agrícola.

Dada la variabilidad natural de clima, el abastecimiento de las necesidades de agua es posible en algunos años con mayor pluviometría, pero imposible en años más secos. La sequía socioeconómica ocurre cuando no se puede atender a la demanda de un bien económico como consecuencia de un déficit en el abastecimiento de agua. Por ejemplo si una central hidroeléctrica deja de producir energía eléctrica porque el embalse en el que está instalada se queda sin reservas, como la demanda de suministro eléctrico es la misma, se entra en una situación de sequía socioeconómica. Esta misma situación de escasez del recurso en una cuenca en la que no existe una central o en la que no existe una demanda de energía eléctrica, no se produce un escenario de sequía socioeconómica.

2.2 CAUSA DE LAS SEQUÍAS.

Las causas de este fenómeno suelen asociarse a una gran diversidad de eventos, a continuación se presenta en la *Figura4* la clasificación de las causas de una sequía.



Figura4. Clasificación de las causas de sequía de acuerdo a su origen.
Fuente: Adaptación de (Ortega - Gaucín, 2012).

Causas naturales de la sequía.

Patrones de circulación global atmosférica, la atmósfera se puede dividir en capas según la variación de la temperatura. El 50 % de la masa total de la atmósfera se concentra en los primeros 5 km de altura. Los fenómenos meteorológicos que más directamente nos afectan se desarrollan en la Tropósfera. En la *Figura 5* se parecían las principales capas de la atmósfera terrestre y sus alturas correspondientes.

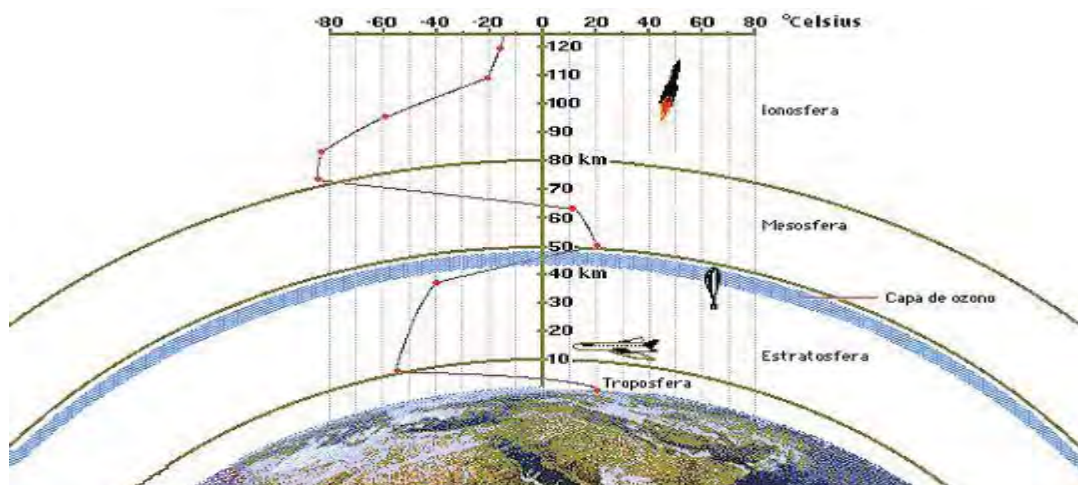
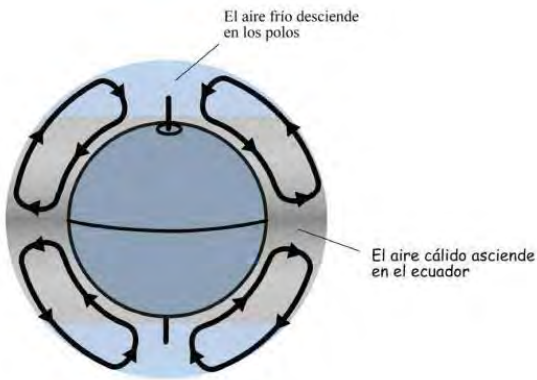
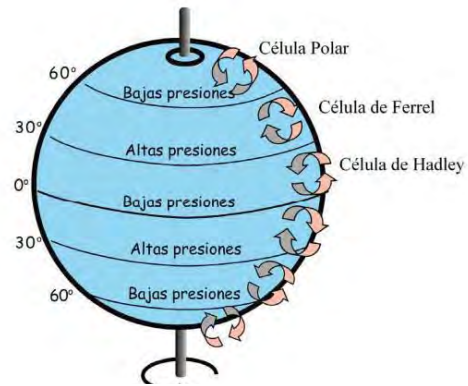


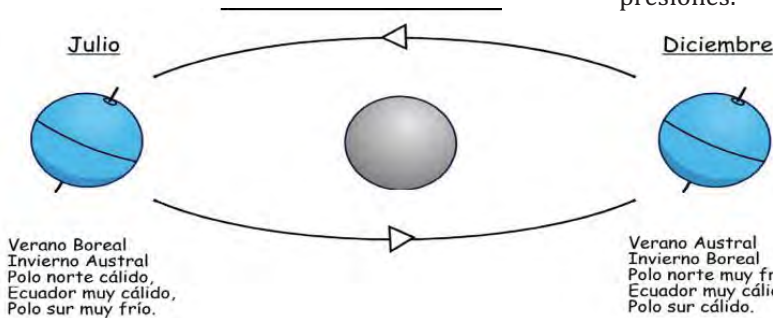
Figura 5. Espesores y temperaturas en las capas de la atmósfera terrestre.
Fuente: Adaptación de (Ortega - Gaucín, 2012).



Si la tierra fuera pura agua y sin movimiento de rotación el aire caliente se movería hacia los polos y el aire frío hacia el ecuador.



- El efecto de la rotación divide la circulación en 3 células diferenciadas.
- A latitud aprox. de 30°N y 30°S se produce descenso de aire desde capas altas a la superficie, creando un "cinturón" de altas presiones.
- A latitud aprox. de 60°N y 60°S se produce ascenso de aire desde la superficie hacia las capas altas, creando un "cinturón" de bajas presiones.



Los gradientes de temperatura son más acentuados en los veranos, lo que significa más probabilidad de vientos fuertes y ciclones.

La tierra y el agua tienen diferente capacidad calorífica específica.

En el hemisferio sur hay más océano que tierra-lo que indica menor variación estacional.

En el hemisferio Norte ocurre al contrario existe mayor variación estacional y patrones de circulación más complicados.

Por todo lo anterior los sitios de la tierra ubicados entre los 30° N y 30° S tienden a ser secos por no tener circulación de humedad.

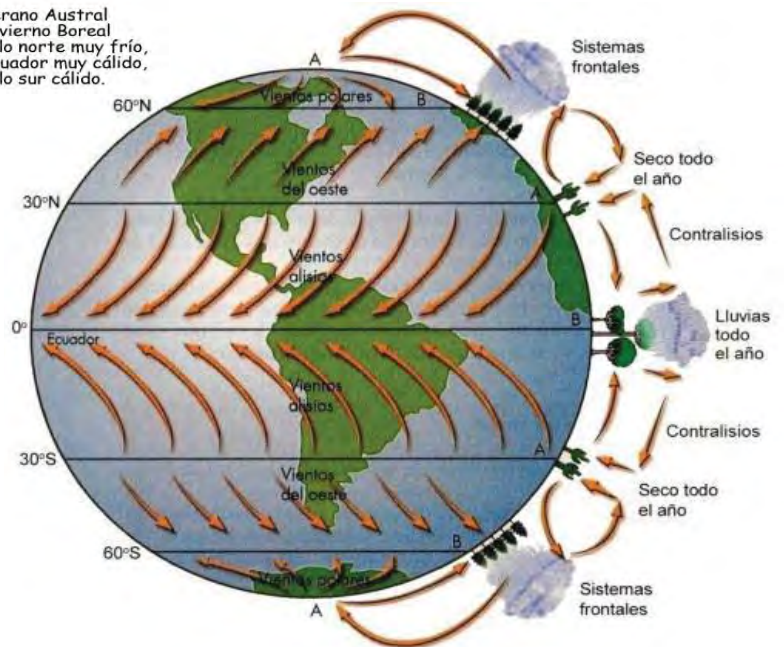


Figura 6. Método simplificado de la circulación general del aire.

Fuente: Adaptación de (Ortega - Gaucín, 2012).

Como se muestra en la Figura 6 existe un conjunto de capas en la atmósfera que hace que se tenga una variación en la temperatura dependiendo de la altura. Dichos cambios de temperatura son producto de la radiación solar que a su vez da origen a la

formación de masas de aire con diferentes temperaturas y que dan lugar a la generación del viento. En la *Figura 7* se muestra el proceso de formación de los vientos.

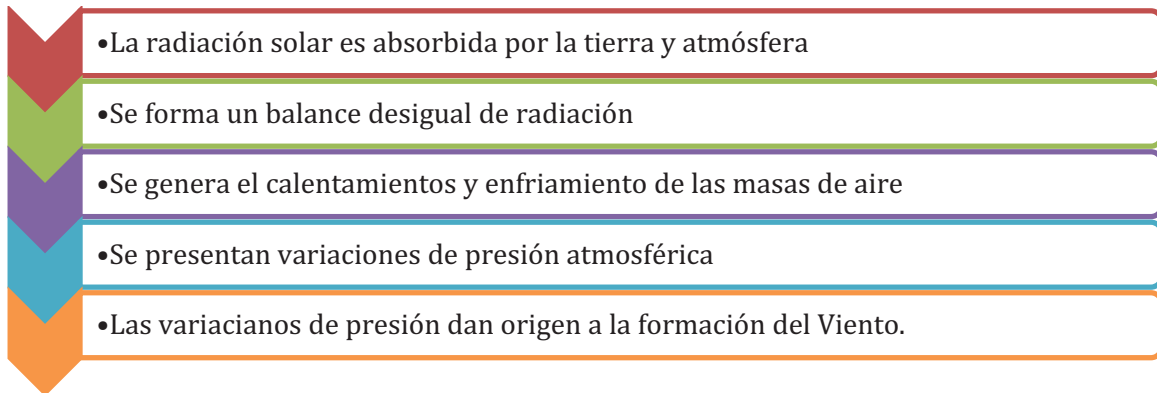


Figura 7. Proceso de formación de las masas de aire.
Fuente: (Ortega - Gaucín, 2012).

Con las explicaciones de las *Figura 6* y *Figura 7* se reconoce la importancia de la radiación solar y de los movimientos naturales de la tierra para la formación de las corrientes atmosféricas y que a su vez den lugar a la generación de humedad y precipitaciones.

México tiene gran parte de su territorio en la franja de alta presión de latitud norte, por lo que cuenta con zonas áridas y semiáridas que coinciden en latitud con las regiones de los grandes desiertos africanos, asiáticos y australianos. Además, por sus características orográficas, este tipo de zonas también se localizan en el altiplano central de la República Mexicana. Las zonas áridas son lugares donde la humedad disponible normalmente es insuficiente para mantener el potencial vegetativo y de actividades económicas regionales o locales, y ello tiene su explicación en la ubicación geográfica, la orografía, la altitud y algunos otros aspectos geográficos.

La **actividad solar** y su variabilidad es una componente de la variación del clima y posible causa de sequías.

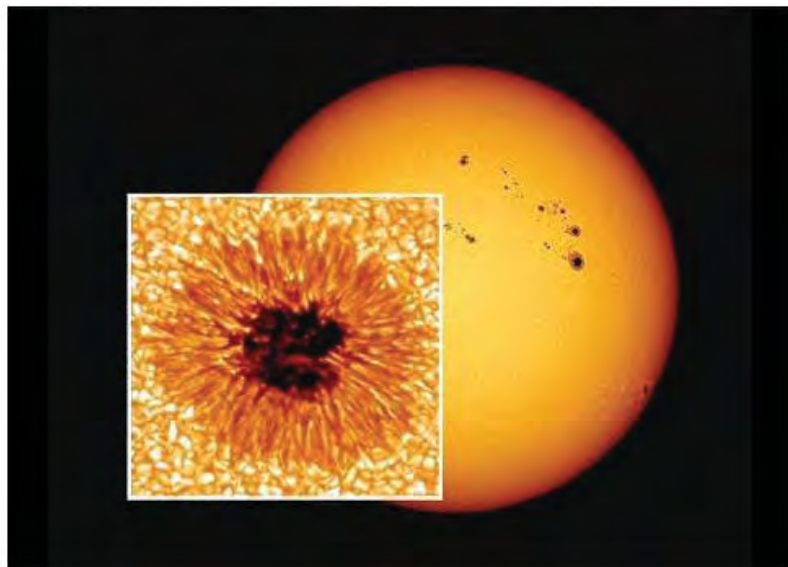


Figura8 La superficie solar y sus manchas, algunas llegan a ser tan grandes como el planeta Júpiter.
Fuente: (Universidad de Utrecht, Holanda).

Las manchas solares fueron el primer fenómeno variable en el tiempo que fue observado sobre el disco de nuestro Sol (Ver Figura8). Galileo Galilei (1564-1642) las descubrió en 1609, tras haber inventado el telescopio. Por mucho tiempo se consideró que era ocioso estudiarlas, pues su significado permaneció desconocido hasta principios del siglo XX. Hoy los científicos saben que esas manchas reflejan la variación de la actividad magnética solar, y que ésta tiene múltiples consecuencias en nuestro planeta y su atmósfera. (Ver Figura9).

En 1843, después de 17 años de observaciones, el naturalista alemán Samuel Heinrich Schwabe (1789-1875) concluyó que el número de manchas solares varía periódicamente. Fue el primer indicio de que el sol experimenta cambios cíclicos, los cuales exhiben una periodicidad media de 11 años, mientras la longitud de cada ciclo dura entre 9 y 13 años. La amplitud y la longitud del ciclo descubierto por Schwabe dan información sobre la intensidad y la frecuencia de los fenómenos asociados con la actividad solar que afectan al clima y a la vida sobre la Tierra. Por estas razones, el primer paso para entender la variabilidad climática debida a la actividad solar es encontrar cómo predecir en el largo plazo la intensidad y la longitud de los ciclos de Schwabe.

En una investigación realizada en la península de Yucatán para reconstruir la historia climática de la región en los últimos 2 mil 600 años, se encontró un patrón recurrente de la sequía con periodicidad de 208 años que está directamente relacionado con las

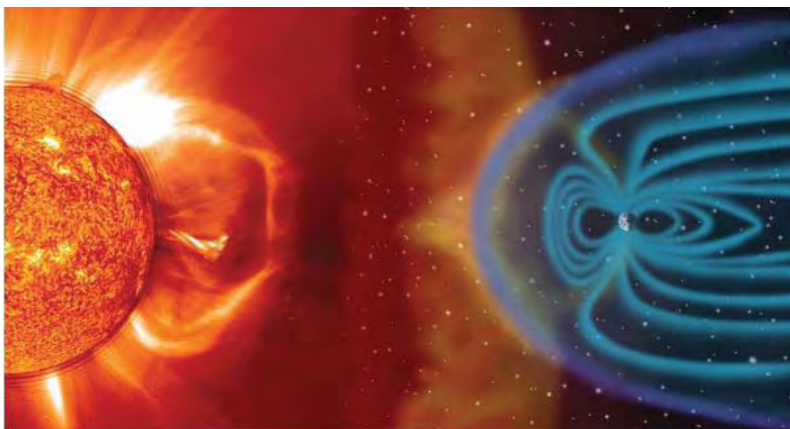


Figura9. Eyección de plasma sobre la atmósfera terrestre.

Fuente: (Hil, 2013)

variaciones documentadas en la actividad solar en períodos de 206 años, por lo que se concluyó que un componente importante de las sequías en esta área geográfica es la variación de la actividad solar (Hodell et al., 2001).

Actualmente, todos los modelos matemáticos de predicción del clima toman la radiación como la única fuente de energía solar. Como esta varía poco con la actividad solar, da cuenta de sólo un 40% del ascenso de la temperatura desde entonces. La Doctora en física Silvia Duhau de la Universidad de Buenos Aires sostiene que las variaciones en el clima provocadas por la actividad magnética solar se relacionan directamente con la intensidad del campo magnético que resulta de ella.

En la *Figura9*, se muestra como una eyección de plasma embiste la atmósfera de la tierra produciendo un campo de choque, produciendo grandes cambios a nivel de periodos geológicos en la atmósfera.

En este punto es importante recordar que las nubes no surgen de la nada. El vapor de agua de la atmósfera forma gotas por condensación alrededor de pequeños núcleos. Hay algunos indicios de que las partículas cargadas eléctricamente en la atmósfera, o iones, son una parte importante en este proceso de nucleación. Se sabe que los rayos cósmicos son una fuente para la ionización de la atmósfera. Por lo anterior, cambios en el campo magnético terrestre provocarían cambios en la formación de nubosidades en la atmósfera.

Por otra parte los fenómenos de **El Niño** y **La Niña**. El Niño, es un fenómeno cíclico, que se produce cada 3 o 7 años. Básicamente es una corriente cálida que se produce frente a las costas del Perú, que en condiciones normales es fría y suele aparecer en Navidad. (De ahí que la llamen El Niño, y fue bautizada por los pescadores peruanos).

El fenómeno del niño es una oscilación del sistema océano – atmósfera en el pacifico tropical teniendo importantes consecuencias para el clima a nivel mundial.

Walker, descubrió que entre Darwin (NW de Australia) y Tahití (E del Pacífico) existe un gradiente de presiones según el cual la presión siempre es mayor en Tahití (de ahí que en Tahití haga mejor tiempo, y en Indonesia y toda aquella zona monzones y lluvias tropicales en condiciones normales). Los vientos alisios se producen debido a esta circulación atmosférica. A esta circulación atmosférica se le llamó célula de Walker.

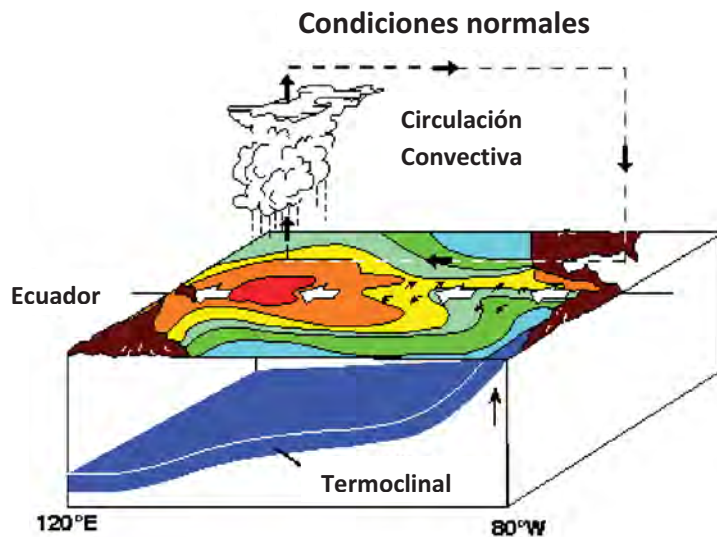


Figura 10. Condiciones normales del clima.
Fuente: (CienciayBiología, 2012)

En condiciones normales la ruta del viento sopla hacia el Oeste a través del Pacífico Tropical. Estos vientos mantienen cálida la superficie del agua en el Pacífico Oeste, de esta manera la superficie del mar está 0.5 m más arriba en Indonesia que en Ecuador (ver Figura 10).

Pues bien, cuando aparece la corriente cálida de El Niño se observa que la circulación de la célula de Walker cambia, aparecen bajas presiones en el E

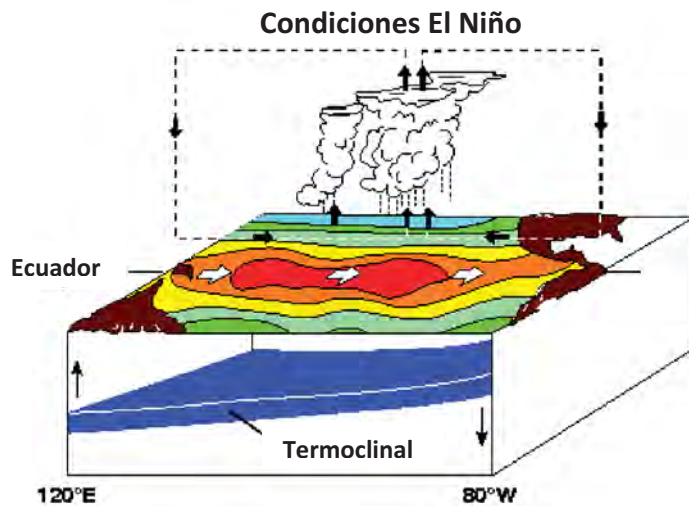


Figura11. Condiciones del clima con Niño.
Fuente: (CienciyBiología, 2012)

En consecuencia el afloramiento de Perú cesa, y aparece la corriente cálida de agua (El Niño). Una vez que aparece esta corriente cálida cuando se reestablece la circulación de la célula de Walker, aparece la corriente de La Niña. Esta corriente es de agua fría, justo al contrario que la del Niño que es cálida, debido a que empieza de nuevo el desplazamiento de agua superficial cálida. La Niña, no supone condiciones normales, es el paso previo para llegar a ellas. (CienciyBiología, 2012)

En la Figura12 se aprecia el proceso del fenómeno de La Niña. En color rojo las temperaturas altas, y azul temperaturas bajas.

Durante este fenómeno, las masas de aguas se desplazan a pesar de que los vientos alisios han cesado, aparecen ondas (olas) grandes y horizontales, cuya amplitud es de unos 100 Km y cuyo período es de 10 días.

Bien, el interés social y económico en el estudio y reconocimiento de este fenómeno es muy importante, pues cambia el régimen climático durante el año que dura como se muestra en la Figura13. Con la aparición de El Niño surgen los siguientes eventos:

del Pacífico, y se divide en dos células diferenciadas en direcciones convergentes en el Centro del Pacífico (ver *Figura11*). En rojo aparecen las temperaturas altas (cálidas) y en azul las bajas (frías), se observa el ascenso de agua, y la circulación diferente de los vientos ilustrado por las flechas blancas.

Esto provoca varias cosas:

Los vientos alisios americanos cesan debido al cambio de circulación oceánica.

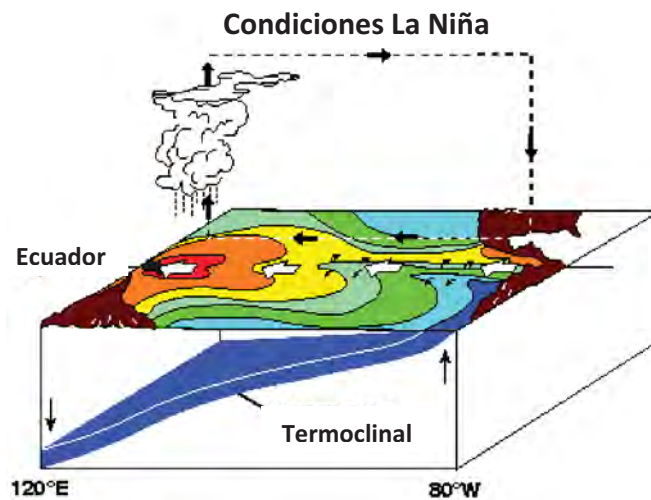


Figura12. Condiciones del clima con Niña.
Fuente: (CienciyBiología, 2012)

- Aparecen lluvias intensas en el Centro y Este del Pacífico (huracán Mitch coincidente con la última gota fría grave en el Mediterráneo con víctimas mortales en el 1997).
- En el otro lado de América, en su lado Atlántico aparece sequía, debido al cambio de presiones provocado por este fenómeno.
- Afecta a los corales, pues el cambio de temperatura y nutrientes los debilita y el efecto físico del cambio de temperatura los rompe.
- Mueren aves, como en 1986 (episodio de gota fría en el Mediterráneo grave), por ejemplo el 78% de aves murió por la escasez de peces.
- Cambios en la concentración de CO2 en la atmósfera.

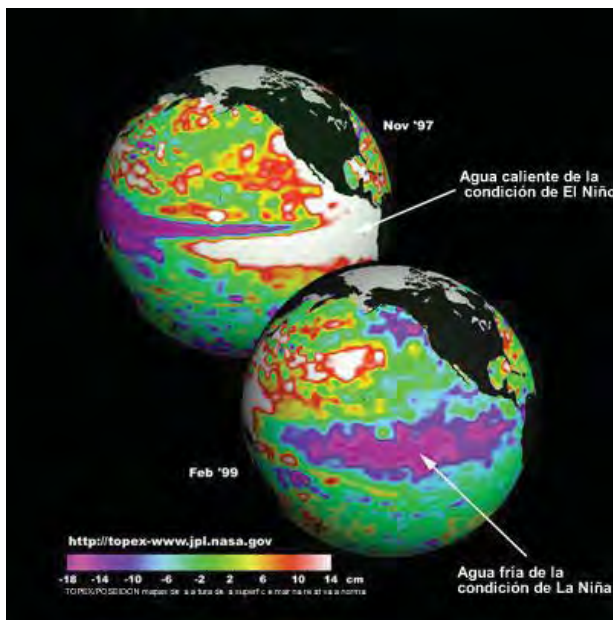


Figura13. Temperatura del océano con el Niño y La Niña.

Fuente: NASA, 2012

Cuando hay Niño, el océano no emite CO2 a la atmósfera, mientras que en condiciones normales, el ascenso de agua profunda, cargada de CO2 hace que se emita éste a la atmósfera.

Cuando aparece la Niña, los efectos son los contrarios, inundaciones en el Oeste del Pacífico y sequía y frío en el Este. (CienciayBiología, 2012)

En México, el fenómeno de El Niño tiene grandes impactos en los patrones de variabilidad de la precipitación. De manera general, se puede decir que las lluvias de invierno se intensifican en los años en que ocurre El Niño (por ejemplo, los inviernos de 1982-83, 1986-87, 1991-

92, y 1997-98) y se debilitan durante los veranos correspondientes. Lo opuesto ocurre aproximadamente durante los años en que se presenta La Niña, que es la fase fría de ENSO. En inviernos de El Niño, la corriente de chorro de latitudes medias se desplaza hacia el sur, provocando una mayor incidencia de frentes fríos y lluvias en las zonas norte y centro de México. Durante veranos de El Niño, las lluvias en la mayor parte de México disminuyen, apareciendo incluso condiciones de sequía. (Magaña, 1998).

Por el contrario, en los años en que sucede La Niña las lluvias parecen estar por encima de lo normal en la mayor parte del país (Magaña, 1998).

Otro evento de generación de sequías es el **movimiento de precesión**. Los movimientos de rotación y traslación serían los únicos que la Tierra ejecutaría si ésta

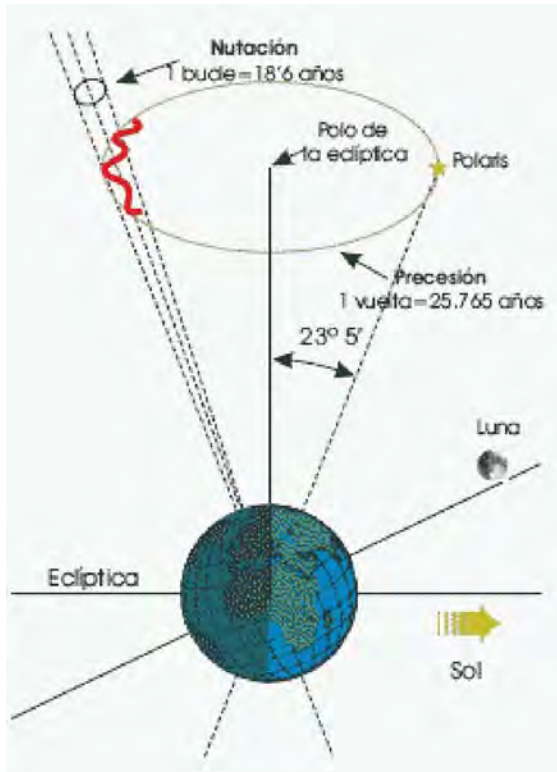


Figura14. Movimiento de precesión de la tierra.
Fuente: (Díaz, 2007)

fuese completamente esférica, pero al ser un elipsoide de forma irregular aplastado por los polos la atracción gravitacional del Sol y de la Luna, y en menor medida de los planetas, sobre el ensanchamiento ecuatorial provocan una especie de lentísimo balanceo en la Tierra durante su movimiento de traslación. Este movimiento recibe el nombre de precesión y que se efectúa en sentido inverso al de rotación, es decir en sentido retrógrado (Ver Figura14).

Hay un segundo fenómeno que se superpone con la precesión, **es la nutación**, un pequeño movimiento de vaivén del eje de la Tierra. Como la Tierra no es esférica, sino achatada por los polos, la atracción de la Luna sobre el abultamiento ecuatorial de la Tierra provoca el fenómeno de nutación. Mientras el eje de rotación describe el movimiento cónico de precesión, recorre

a su vez una pequeña elipse o bucle en un periodo de 18,6 años, y en una vuelta completa de precesión (25,767 años) la Tierra habrá realizado más de 1,300 bucles.

Estos movimientos hacen que los rayos del sol incidan de forma diferente sobre la superficie terrestre haciendo que exista un cambio climático global.

En cuanto a **las erupciones volcánicas**, en el libro “Las grandes sequías Mayas” (Richardson, 2008), se hace mención a la existencia de informes encontrados en los registros gubernamentales españoles escritos durante el periodo colonial, en crónicas indígenas escritas poco antes de la conquista española y en otras fuentes históricas, que se registraron 24 hambrunas y, en 13 casos, se informó que la sequía fue la causa que las precipitó. De esas sequías/hambrunas, 11 ocurrieron en el transcurso de dos años después de una erupción volcánica tropical importante.

En el valle de México, del que existen excelentes registros históricos, en un estudio preparado por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, se encontraron aproximadamente 30 episodios de sequía registrados entre 1440 y 1840 que duraron tres o más meses, algunos de los cuales por supuesto duraron años. De las sequías

registradas al menos 18 ocurrieron en dos años posteriores a grandes erupciones tropicales conocidas.

No siempre una erupción causa una sequía, sin embargo propicia las circunstancias para que se presente una, siendo los siguientes factores los que originen una sequía por erupción.

- La ubicación del volcán.
- La mecánica de la erupción, dirección, explosividad, altura de la eyección y por último la cantidad y tipo de material eyectado.
- La composición química del material arrojado debe ser rica en azufre.
- Condiciones meteorológicas de los trópicos.
- La estación del año.
- La dinámica atmosférica.

Causas antropogénicas de la sequía.

Es probable que, aún en pequeña escala, pero de manera creciente, las actividades humanas estén influyendo en la ocurrencia de sequías y de otros fenómenos hidrometeorológicos extremos. A pesar de que el clima cambia de manera natural, los expertos señalan que existen claras evidencias de que el calentamiento del planeta registrado en los últimos 50 años puede ser atribuido a los efectos de las actividades humanas. Como resultado de la quema de combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón) y la destrucción de los bosques, se ha incrementado considerablemente la emisión de gases de efecto invernadero (bióxido de carbono, metano, óxido nitroso y ozono, principalmente), con lo cual se ha afectado el flujo natural que existe entre las fuentes naturales y la atmósfera, y por ende, se han alterado las condiciones climáticas del planeta (Ortega - Gaucín, 2012).

La evidencia más contundente de que el cambio climático está ocurriendo es el incremento de la temperatura promedio mundial (por ejemplo, los cinco años más calurosos desde 1890, en magnitud descendente, han sido 2005, 1998, 2002, 2003 y 2004), aunque también se han observado importantes alteraciones en otros elementos del clima, como la precipitación y la humedad, así como el deshielo de los glaciares y el aumento en el nivel del mar y en la frecuencia de las sequías, tornados y huracanes.

Por otra parte, la deforestación y los cambios en el uso del suelo, propician la desertificación de amplias zonas, haciéndolas más susceptibles y vulnerables a la falta de agua. Con estas acciones, el suelo 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 (Ortega - Gaucín, 2012).

Asimismo, existen razones de peso para afirmar que las sequías se auto perpetúan en cierto grado, ya que una vez que la superficie del suelo está libre de vegetación, devuelve una mayor cantidad de calor a la atmósfera favoreciendo el predominio de cierto tipo de nubes continentales (cumulus) sobre las marítimas; lo que propicia menores lluvias (CENAPRED, 2001).

Como resumen de este apartado, se podría decir que ahora es ampliamente aceptado que la acción del hombre ha comenzado a alterar el estado natural de nuestro planeta. Los cambios que los humanos imponen al medio ambiente, como el aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, o cambios en el uso del suelo, pueden modificar ciertos procesos meteorológicos relacionados con la lluvia y la temperatura. (Ortega - Gaucín, 2012).

Los ecosistemas del mundo están perdiendo su equilibrio, todos los elementos del ambiente están interrelacionados entre sí, por lo que al alterar uno de ellos se originan cambios en los demás, algunas veces imperceptibles pero que con el tiempo generan grandes cambios a gran escala.

Por ello, las modificaciones ambientales de origen antropogénico, indudablemente han tenido un papel relevante en la presencia de anomalías hidrometeorológicas en los últimos años, entre las cuales se encuentran la mayor frecuencia y severidad de las sequías.

2.3 CONSECUENCIAS DE LA SEQUÍA.

Desertificación

La desertificación es el proceso por el cual tierras productivas o habitables se hacen cada vez más áridas y pierden la capacidad para mantener vegetación, convirtiéndose finalmente en desierto. Con frecuencia es la causa de desastres a largo plazo.

Pérdida de cultivos, escasez de alimentos, malnutrición y hambre.

La escasez de alimentos es el resultado de una reducción anormal del rendimiento de los cultivos, de manera que la cosecha no es suficiente para cubrir las necesidades nutricionales o económicas de la comunidad. Como consecuencia de la escasez de alimentos inducida por la sequía, muchas personas, en particular mujeres embarazadas, madres lactantes, bebés y niños, carecen del equilibrio de nutrientes adecuado para la salud y el bienestar. Una hambruna es una escasez de alimentos de carácter catastrófico que afecta a una gran cantidad de personas, ocasionada por factores climáticos, medioambientales o socioeconómicos. Las

hambrunas pueden cobrarse víctimas mortales, potenciar la aparición de enfermedades y dar lugar a desplazamientos en gran escala.

Epidemias.

Por su parte, una alimentación insuficiente reduce la resistencia de las personas a enfermedades e incrementa el riesgo de brotes de enfermedades que pueden prevenirse. La escasez de agua, que obliga a las personas a utilizar agua contaminada, favorece la propagación de enfermedades transmitidas por el agua.

Desplazamientos de poblaciones.

Los problemas de seguridad alimentaria pueden inducir a las personas a desplazarse a otros lugares. Es posible que las poblaciones rurales migren a las afueras de las ciudades en busca de mejores condiciones de vida.

Emergencias complejas/conflictos.

La migración masiva desde regiones afectadas por sequía puede ocasionar tensiones en las comunidades de acogida, al dar lugar a una competencia por los recursos naturales escasos, como la tierra o el agua.

Incendios forestales y pérdida acelerada del suelo.

La falta de humedad en las plantas aumenta la materia orgánica potencialmente combustible haciendo más susceptible a que se forme un incendio forestal. Una vez consumida por el fuego la capa vegetal, el suelo queda desprotegido ante los agentes climáticos como son el viento y la lluvia.

2.4 SEQUÍAS HISTÓRICAS EN MÉXICO Y EN EL MUNDO.

Conocer los efectos de sequías acontecidas en el pasado es de vital importancia para prevenir y planear acciones que permitan mitigar los efectos de este tipo de fenómenos naturales.

Se cree que las sequías ocurridas en el pasado pudieron haber sido la causa de la desaparición de civilizaciones completas; el hambre la sed y las enfermedades causadas por la sequía. Como ejemplo se tienen la acadia en Mesopotamia, la tiwanaku y la moche en Sudamérica, la anasazi en la América del Norte, y la tolteca y la maya en Mesoamérica del Norte así como a otras en alrededor del mundo. (Ortega - Gaucín, 2012).

Investigadores de la Universidad de Saint Andrews, Reino Unido, han confirmado que un periodo de sequía muy severo ocurrido hace cuatro mil doscientos años

aproximadamente, podría haber contribuido a la desaparición del imperio egipcio. (Ortega - Gaucín, 2012).

Un estudio llevado a cabo en los últimos años (1996-2011) por investigadores del Observatorio de la Tierra Lamont-Doherty de la universidad de Columbia en Palisades, Estados Unidos, revela la existencia de cuatro mega sequías en los últimos mil años que asolaron a la especie humana.

El estudio se basó en el análisis de los anillos de 300 árboles en toda Asia y duro 15 años. Según los resultados en ese lapso se registraron al menos cuatro sequías épicas, que están relacionadas con grandes catástrofes históricas. El clima pudo haber jugado un importante papel en la caída del imperio Ming en 1644 ya que la falta de agua podría haber incentivado las rebeliones en su contra.

El derrumbe político y económico de algunas civilizaciones avanzadas, como la micénica, minoica, o del vasto imperio hitita al final de Edad de Bronce, había sido atribuido hasta ahora a destrucciones humanas debidas a invasiones en el Delta del Nilo, las costas turcas, Siria y Palestina. Los autores del trabajo, publicado en la revista estadounidense PLOS ONE, analizaron el polen encontrado en sedimentos del lago salado de Larnaka, en Chipre, y encontraron que el cambio de los isotopos de carbono, la 'estructura química' de las plantas locales y de la región, muestra que dicho lago tuvo una época húmeda antes de secarse paulatinamente. Este período corresponde a una sequía de cuatro siglos que originó la aniquilación de las civilizaciones.

Al combinar estos datos con índices arqueológicos como tabletas cuneiformes y la correspondencia epistolar entre monarcas, los investigadores concluyeron que la crisis del fin de la Edad del Bronce en el Mediterráneo oriental fue un episodio complejo que se produjo por una sequía provocada por un cambio climático que desató hambrunas, invasiones extranjeras y conflictos políticos.

Los anillos indican entre 1756 y 1758, un periodo que coincide con el colapso de los reinos de los actuales Vietnam, Tailandia y Birmania. La sequía que asoló entre 1790 y 1796 se sintió a lo largo y ancho del globo terráqueo. Trajo consigo levantamientos civiles y tumultos. La más sonada de estas rebeliones fue la Revolución francesa.

Pero la peor de todas fue la Gran Sequía de la era victoriana, entre 1876 y 1878. Afecto a los trópicos y provoco hambrunas que acabaron con la vida de 30 millones de personas. Con base en las pruebas que aportaron los anillos arbóreos, esta falta de lluvias fue especialmente terrible en la india, extendiéndose hasta China y la actual Indonesia. (Ortega - Gaucín, 2012).

Las estadísticas recopiladas por el comité Alemán para la Década Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales (IDNDR, por sus siglas en inglés), indican que la sequía fue la principal causa de víctimas de desastres naturales a nivel mundial durante el siglo XX (1900-1998). En términos de pérdidas económicas, debido a que los daños causados por sequías no son estructurales las pérdidas asociadas a este fenómeno ocuparon el quinto lugar en la relación de desastres naturales ocurridos a nivel mundial durante el periodo de 1976 a 1998. (Ver Figura15).

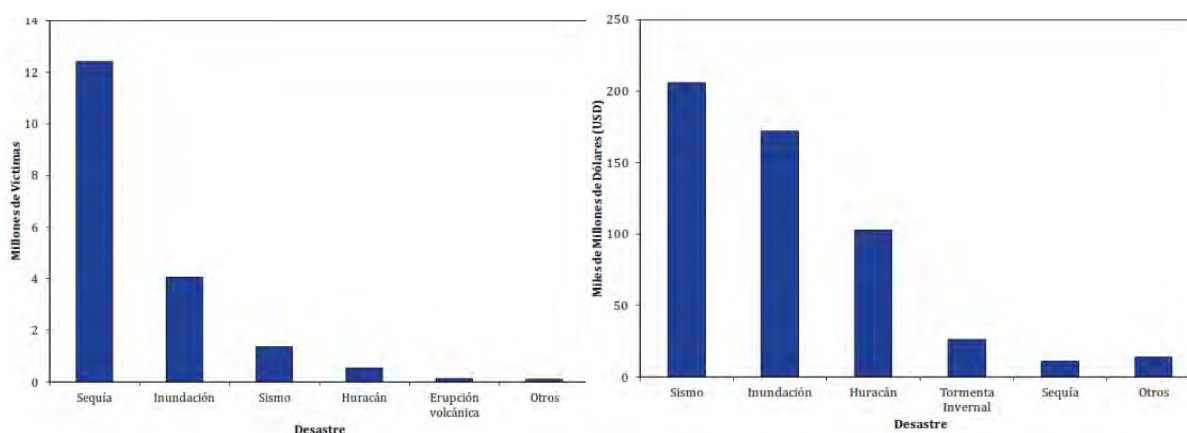


Figura15. Víctimas humanas y pérdidas económicas por desastres naturales en el mundo.
Fuente: (Ortega - Gaucín, 2012).

México ha padecido los efectos de la sequía a lo largo de su historia. En la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4 se muestran algunos años con episodios de sequía en diferentes épocas de México. La simbología correspondiente es la siguiente: C = Centro; N = Norte; S = Sur.

Tabla 2 Cronología de sequías en el México Prehispánico.

Año	Lugar
1500 A.C.	Valle de México
300 D.C.	Valle de México
1052	Tula
1064	Valle de México
Siglo XII	Centro-Norte
1287	Valle de México
1328	Valle de México
1332	Valle de México
1347	Valle de México
1448	Valle de México
1450-1454	Valle de México
1460 ó 1464	Valle de México
1502	Valle de México
1514	Valle de México

Fuente: (García V. , 1997)

El resultado de estos periodos prolongados de sequía era hambre, migración y muerte, que alteraba no sólo la actividad agrícola sino la vida misma de las comunidades.

Tabla 3 Cronología de sequías en el México Colonial.

Año	Lugar	Año	Lugar	Año	Lugar
1535	S	1664	CN	1768	C
1543	C	1666	CN	1769-70	CN, C
1551-2	S	1667-8	CN, C	1772	CN, C
1557	C	1684-6	CN, C	1773	CN, C
1563-4	CS	1688	CN	1775	N
1568	C	1691	CN, C	1777	N
1597	C	1694-6	CN, C	1778	C
1571	S	1701-2	CN, C	1778-9	CS
1576	C	1703	CN	1779	C
1580	C	1705	C	1780-1	CN, C, CS
1587-8	C	1708	CN	1784-5	N
1590	C	1711	C	1785-6	C, CN
1595	C	1713	CN, C	1786	N, S
1597-1609	C	1720	C	1789	CN, N
1611	C,CN	1725-7	S	1793	C, N
1615-6	C	1735	CN	1794-5	C, CN
1618	C	1739	CN	1798	N
1620	C	1746-7	CN	1799	C
1621	C	1748	CN	1801	C
1624	C	1749	CN, C, N	1804	C, CS
1639	C	1755	C	1805-7	N
1641-2	C	1762	C	1807	S
1648	CS	1763-4	N	1808-10	C, CN, N
1653	C	1764	C	1816	N
1661-3	CN, C, S	1765	C		

Fuente: (García V., 1997)

Se cree que la causa del colapso de algunas civilizaciones precolombinas como la caída de Teotihuacán y la civilización maya fue la sequía. En la época colonial la sequía fue casi continua, de modo que sus efectos se prolongaron y se volvieron acumulativos para la población, cuya mayoría dependía de la agricultura como actividad económica. En el periodo Independiente las sequías continuaron afectando la agricultura que era la actividad económica principal para mucha gente.

La independencia de México, en septiembre de 1810 fue precedida por tres años de sequía y malas cosechas, que tuvo como principal detonante social la creciente

carestía de los alimentos. La insurrección fue sostenida por la enorme cantidad de campesinos y peones que se encontraban sin trabajo, sin alimentos y sin nada que perder.

Tabla 4 Cronología de sequías en el México Independiente.

Año	Lugar	Año	Lugar	Año	Lugar
1822-3	S	1867-8	CN	1882-83	CS, C, N
1823	N	1868	N, CS, S	1883	N, CN, C, CS
1826-8	C, CN, N	1869	CN	1884	N, CN, C, CS
1830	C	1870	CN	1885	N, CN, C, CS
1834-5	S	1872	N	1886	N, C, CS
1836	C, CS	1873	CN	1886-7	N
1842-3	CN, C, CS	1874	CN	1887	N, CN, CS
1847	N	1875	C, CN	1889	CN, N
1850	C, CN, N	1876	C, S	1891	C, CN, N
1851	C, CN, N	1877	C, CN, N, CS	1894-5	C, CN, N
1852	C, CN, N	1878	CS, C, N	1896	C, CN, N
1854	C, CS	1879-80	CN, N, CS, S	1897	N
1853	N	1880	N, CN, CS	1898	CN, N
1864	C, CN, N	1881	N, CN, S	1899	CN, S
1866	CN	1882	CS, C, N	1900	C, CN

Fuente: (García V., 1997)

Al igual que en el movimiento de independencia, la revolución en noviembre de 1910, hizo su aparición en un México azotado por la sequía, siendo las más severas en los años de 1908, 1909 y 1910. Estos continuos desastres agrícolas vinieron acompañados de la consecuente secuela de hambre, desempleo y turbulencia campesina.

Una vez consumada la revolución mexicana, durante el periodo comprendido entre los años de 1917 y 1977, se registraron por lo menos 38 sequías. Las más importantes ocurrieron en los años de 1925, 1935, 1957, 1960, 1969 y 1977, siendo quizá la de 1925 la más severa. Las décadas de 1950 y 1960 fueron relativamente húmedas, especialmente en la parte central de México. Por el contrario, las décadas de 1970 y 1980 fueron particularmente secas, con reducidas cosechas. En año de 1979 la ausencia de lluvias ocasionó la destrucción de aproximadamente el 19 por ciento del área total plantada en México, siendo las pérdidas, en una porción significativa de la parte central y norte del país, de más del 50 por ciento. El principio de la década de 1990 vio condiciones húmedas en la mayor parte del país. En general, la producción agrícola en el país se ha deteriorado a partir de la década de 1960, y durante estos años se empezaron a incrementar significativamente las importaciones de maíz. Desde la década de 1970, México se transformó en un importador neto de grano,

alcanzando un total de 20 a 25 por ciento del suministro necesario durante la década de 1980.

Con base en la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4, entre 1500 a.C. y el siglo XVI d.C. hubo un total de 14 sequías, en el siglo XVI fueron 14, en el siglo XVII 18, de 1700 a 1821 existieron 42 sequías y entre 1821 a 1899 hubo un total de 46. Las zonas con mayor recurrencia de sequía son del centro al norte del país. (García V. , 1997).

Dentro de las mayores amenazas a la seguridad nacional están los efectos causados al medio ambiente. Su mayor impacto en México se sentirá en los de por sí ya escasos recursos naturales como lo es el agua. Los escenarios para el país en las próximas décadas indican que habrá temperaturas más altas y un clima más seco en la mayor parte del territorio nacional, alterando significativamente la futura disponibilidad de los recursos hidráulicos. (Martínez & Patiño, 2010).

Es importante anotar que en el periodo 1987-1992 se produjo en el suroeste de Estados Unidos y el norte mexicano una de las peores sequías del siglo XX.

Como colofón a lo anterior, se acota que en el periodo 1993-1996 se presentó uno de los cuatro grandes periodos de sequía en México durante el siglo XX, con pérdidas de mil millones de dólares en el campo, las presas en el nivel más bajo de su historia; 4.6 millones de hectáreas de cultivos dañados y otros seis millones sin poder ser cultivados por la falta de agua; 300 mil cabezas de ganado se perdieron y otras 700 mil tuvieron que ser vendidas muy por debajo de su precio; se tuvieron que importar 11.25 millones de toneladas métricas de granos básicos, casi el doble que en 1991. (Florescano E. , 2001)

Por otra parte se reconoce que en México en el año 2009 se presentó la segunda peor sequía en 60 años, que en el año 2010 fue el más lluvioso del que se tenga registro y que en el año 2011, 40% del territorio mexicano registró la peor sequía de las últimas siete décadas (ver Figura 16). En ese mismo año México sufrió uno de los peores años en cuanto a incendios forestales. Coahuila fue de las más afectadas con alrededor de 425 mil has de bosques y matorrales quemadas. (Ortega - Gaucín, 2012)

La comisión Nacional del Agua (CONAGUA) corroboró este fenómeno en diferentes grados en 1 mil 213 municipios de México, lo que permitió aprobar la declaratoria de emergencia por desastre natural en 1 mil 174 de éstos. De las entidades federativas 19 de las 32 sufrieron los estragos de la peor sequía en décadas, entre los que destacan los estados de Coahuila, Chihuahua, Nuevo León, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas. En el año 2012 gran parte de la República Mexicana enfrentó los estragos de una sequía que comenzó a gestarse a finales del año 2010 y cuyos efectos negativos aún siguen vigentes. (Ortega - Gaucín, 2012)

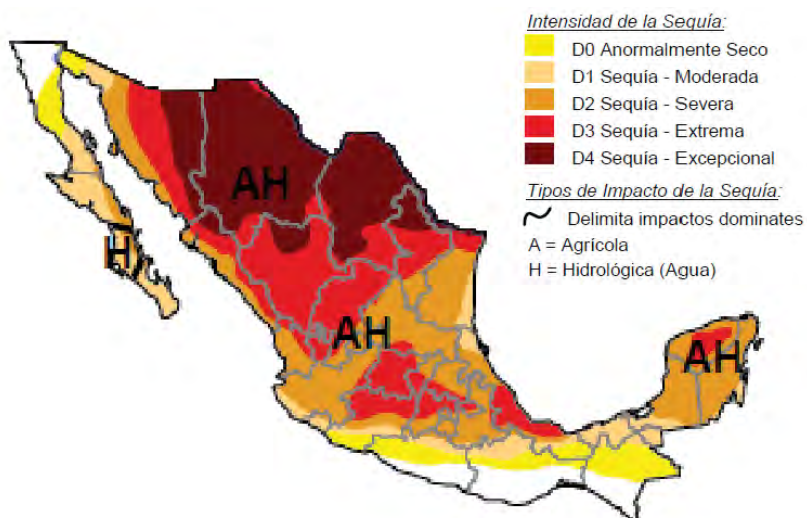


Figura 16. Regiones afectadas por la sequía a junio de 2011.
Fuente: (SMN, 2011).

Lo que ahora se está presentando es un problema completamente diferente, de dimensiones que es necesario estudiar y de consecuencias que se deben anticipar. El problema en el pasado era la sequía y su secuela de falta de alimentos y turbulencia social. El problema que

viene será el de la carencia de agua, con implicaciones no sólo para las actividades agropecuarias, sino también para las actividades industriales y de consumo urbano. No hay precedente de algo parecido en nuestra historia. Una vez perturbadas las actividades económicas aparecerá eventualmente la inestabilidad social. De esto si existen precedentes.

3. MEDICIÓN, SEGUIMIENTO Y MONITOREO DE LA SEQUÍA.

Ante la necesidad de conocer las características de una sequía como la intensidad, duración, extensión y frecuencia, se han ideado un gran número de maneras de medir estas variables del fenómeno a través de diversos índices que se han creado con base en las distintas variables que se ven involucradas durante la ocurrencia de una sequía.

Han sido diversos los autores que han ideado maneras para caracterizar una sequía, asimismo a través de algunos de estos índices se han identificado maneras de dar un seguimiento al comportamiento del fenómeno de la sequía con la intención de prevenir ante su ocurrencia y mitigar los efectos adversos de la misma. En el caso del río Bravo es una cuenca que actualmente es estudiada por su alta recurrencia del fenómeno de sequía.

3.1 INFORMACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN LA REGIÓN.

La información hidrológica disponible está conformada por estaciones distribuidas a lo largo de la región, las cuales proporcionan diversas variables climatológicas que servirán como base para la obtención de índices de sequía de acuerdo a diferentes parámetros.

A continuación se presenta una clasificación de las estaciones, en las que se reconocen dos tipos, las que pertenecen a la red convencional y las que pertenecen a la red automática. Por red convencional se entenderá a todas aquellas estaciones que son operadas por personal que manualmente registran lecturas, y la red automática consta de un sistema de comunicación telemétrica que envía la información climatológica en tiempo real y registra a menores intervalos de tiempo.

De acuerdo a esta clasificación las estaciones se distribuyen en los distintos estados que conforman la cuenca como se presenta en la Tabla 5 y Tabla 6:

Tabla 5 Estaciones existentes en la RHA VI pertenecientes a la red convencional.

RED CONVENCIONAL					
TIPO	TOTAL	CHIH	COAH	N. L.	TAM
CLIMATOLÓGICA	223	26	55	129	13
HIDROMÉTRICA	17	4	2	11	0
OBSERVATORIO	7	3	3	1	0
HIDROLÓGICA	0	0	0	0	0
PLUVIOMÉTRICA	5	0	0	3	2
PLUVIOGRÁFICA	0	0	0	0	0
EN OPERACIÓN	243	29	60	139	15
SUSP. PARA REHABILITACIÓN	9	4	0	5	0

Fuente: Elaboración propia con datos (CONAGUA, 2013).

Tabla 6 Estaciones existentes en la RHA VI pertenecientes a la red automática.

RED AUTOMÁTICA						
TIPO	TOTAL	CHIH	DGO	COAH	N. L.	TAM
C-T	15	1	0	0	10	4
EMA	14	6	1	5	1	1
ESIME	3	2	0	1	0	0
HC-T	22	10	2	3	2	5
H-T	27	6	0	6	9	6
PP	8	0	0	0	8	0
EN OPERACIÓN	85	24	3	13	30	15
MANTENIMIENTO	1	0	0	1	0	0
FUERA DE OPERACIÓN	3	1	0	1	0	1

Fuente: Elaboración propia con datos (CONAGUA, 2013).

A continuación en la Figura17 y Figura18 se presenta de manera gráfica la distribución de las estaciones convencionales en la región administrativa Río Bravo.



Figura17 Distribución de la red convencional en la RHA VI.
Fuente: Elaboración propia con información (CONAGUA, 2013).



Figura18 Distribución de la red automática en la RHA VI.
Fuente: Elaboración propia con información (CONAGUA, 2013).

Como se aprecia en la Figura17 y Figura18 la distribución de las estaciones en la cuenca no es completamente uniforme, pues se aprecia que en el estado de Nuevo León la red de medición cuenta con más de la mitad de las estaciones dentro de la región hidrológica, mientras que en los estados de Coahuila y Chihuahua la densidad de medición es muy baja. Conociendo la distribución espacial de las estaciones en la cuenca es necesario conocer la distribución temporal de los diferentes tipos de estaciones en la misma, pues será un factor que determine el periodo de tiempo con información suficiente para obtener los índices de sequía. Por lo anterior se presenta el siguiente glosario de abreviaturas para designar a cada uno de los tipos de estaciones presentes.

C	Climatológica	T	Telemétrica
H	Hidrométrica	O	Observatorio
HC	Hidrológica	EMA	Estación meteorológica automática
Pg	Pluviográfica	ESIME	Estación sinóptica meteorológica
Pm	Pluviométrica	PP	En proyecto
S	Sedimentos	T	Telemétrica

A continuación en la Figura19, Figura20, Figura21 y Figura22 se observa la distribución temporal de cada una de las redes, donde se presenta el incremento por década del número de estaciones de la región.

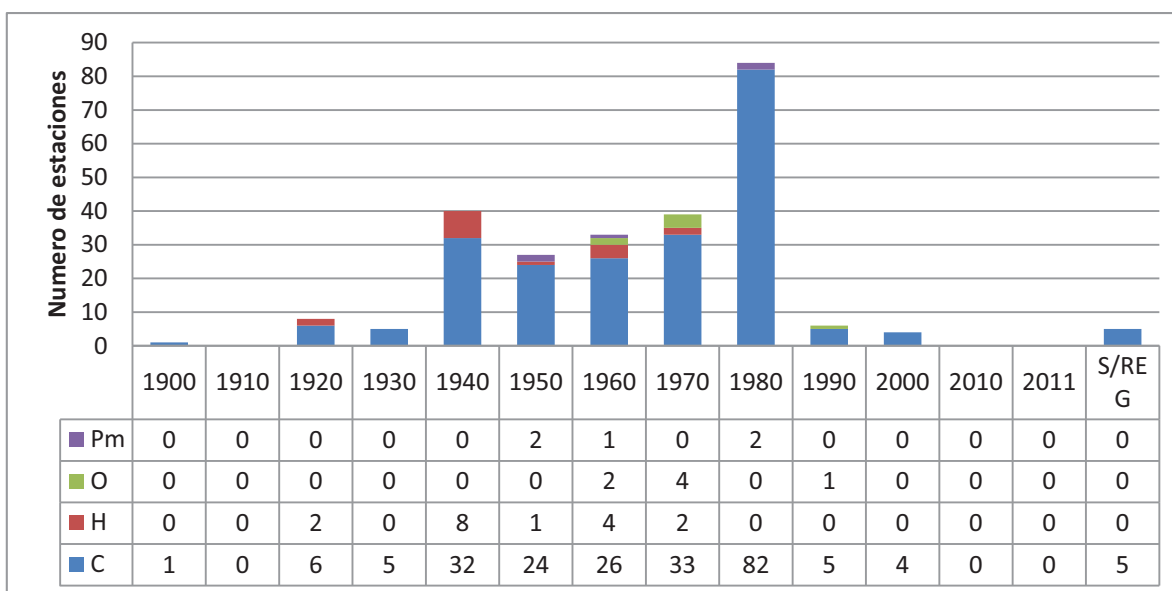


Figura19 Incremento del número de estaciones a la red Convencional por década en la RHA VI.
Fuente: Elaboración propia con información (CONAGUA, 2013).

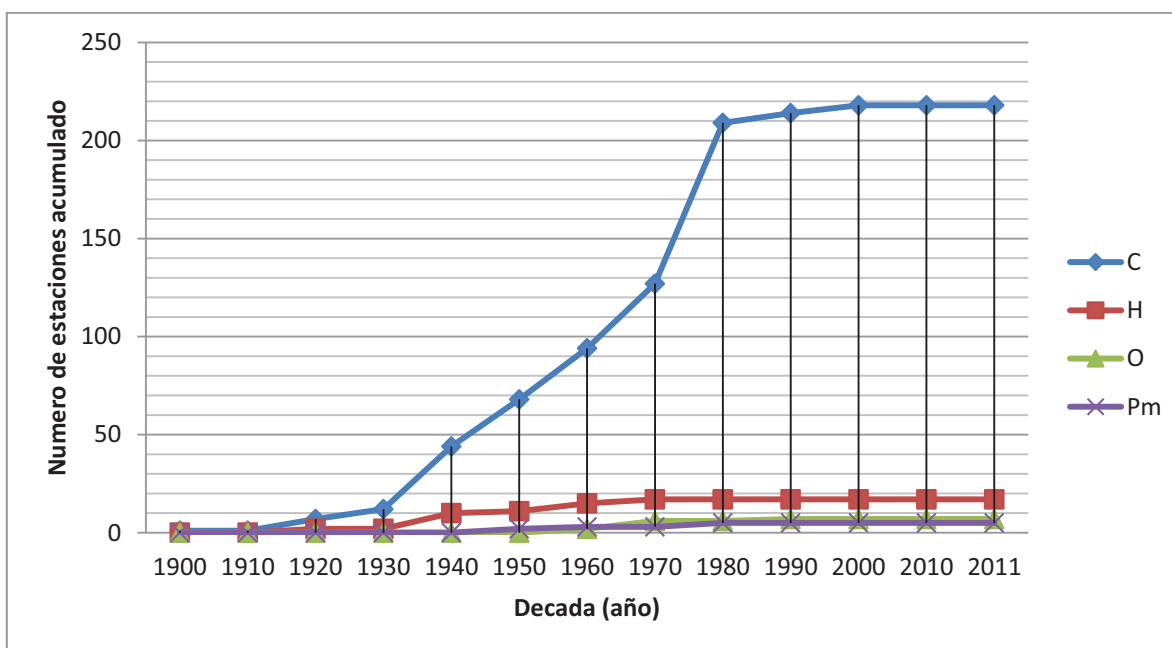


Figura20 Acumulado histórico del número de estaciones en la red Convencional en la RHA VI.
Fuente: Elaboración propia con información (CONAGUA, 2013).

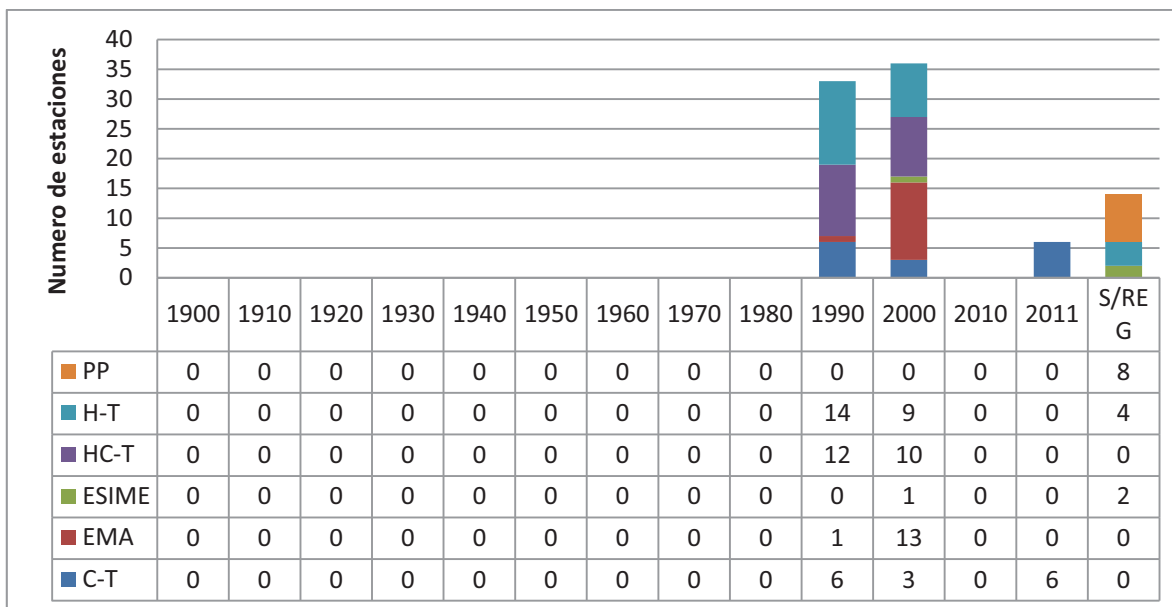


Figura21 Incremento del número de estaciones a la red automática por década en la RHA VI.
Fuente: Elaboración propia con información (CONAGUA, 2013).

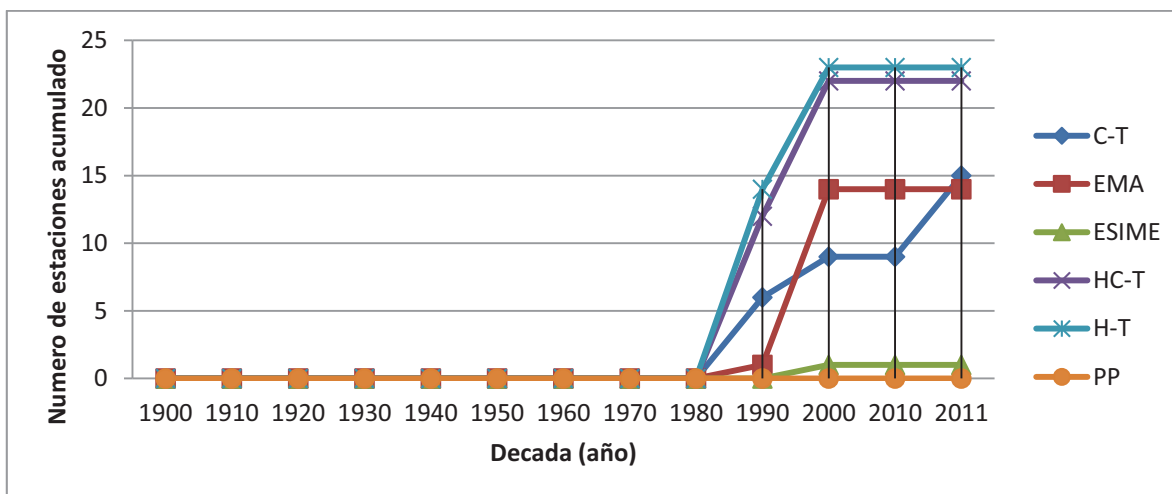


Figura22 Acumulado del número de estaciones en la red automática en la RHA VI.
Fuente: Elaboración propia con información (CONAGUA, 2013).

Como se observa en las figuras anteriores en su mayoría la información que existe es proveniente de estaciones climatológicas convencionales con 223 estaciones, mientras que en la red automática las estaciones más abundantes son las hidrológicas telemétricas e hidrométricas telemétricas.

Conociendo la información disponible, se procederá a definir los índices de sequía con que actualmente se definen los grados de sequía en diversas partes del mundo.

3.2 ÍNDICES DE SEQUÍA EXISTENTES.

Existe un conjunto de indicadores de sequía que dimensionan el fenómeno con base en diversos parámetros. A lo largo del tiempo y de diversas partes del mundo se han desarrollado distintos índices, presentando algunos de ellos en la Tabla 7. (Gallardo & Brown, 2006)

Tabla 7 Índices de sequías existentes en el mundo.

Índice de Severidad de la Sequía de Pálmer	Índice de Aridez de Palfai
Índice Estándar de Precipitación	Índice de Potencial Agro hidrológico
Porcentaje de la Precipitación Normal	Índice de Evapotranspiración Medio o Medio
Índice de Suministro de Agua Superficial	Índice de Evapotranspiración Medio
Índice de Riesgo de Sequía	Déciles
Índice de la Humedad del Cultivo	Índice de Aridez
Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica	Índice de Repetitividad de Sequía
Número de días con precipitación mayor de 30	Indicativo Integrado de Sequía: Mapa de Riesgo
Período de retorno de la precipitación máxima	Índice de Vegetación Diferencia Normalizada
Índice USBR de la Sequía	Índice de Humedecimiento Modificado

Fuente: (Gallardo & Brown, 2006)

Cada uno de estos distintos parámetros requiere de información de diversos tipos como por ejemplo de precipitación, temperatura, humedad del suelo, agua almacenada en vasos, hidrométricas, tipos de cultivos, radiación, velocidad del viento, humedad relativa e insolación media. Cada índice se enfoca hacia un tipo de sequía como se abordó en el capítulo 1, habiendo tres tipos, hidrológica, meteorológica y agronómica. A continuación en la Tabla 8 se aprecia el tipo de sequía que aborda cada uno de los índices y los datos que requiere para su obtención.

Tabla 8 Variables y tipo de sequía analizada de cada uno de los índices existentes.

ÍNDICES	TIPOS DE SEQUÍA ANALIZADA	VARIABLES A UTILIZAR EN LA OBTENCIÓN DE ÍNDICES DE VULNERABILIDAD A LAS SEQUÍAS													
		P	T	H	v. ALM.	Q	N	NAF	EVAPOTRANSPIRACIÓN						
									CUL	R	H.R.	V.V.	I.M.	R.S.R.	
Índice de Severidad de la Sequía	Meteorológica/	✓	✓	✓											
Índice Estándar de Precipitación	Meteorológica	✓													
Porcentaje de la Precipitación Normal	Meteorológica	✓													
Índice de Suministro de Agua Superficial	Hidrológica	✓			✓	✓	✓								
Índice de Riesgo de Sequía	Meteorológica	✓	✓												
Índice de la Humedad del Cultivo	Agronómica	✓	✓												

ÍNDICES	TIPOS DE SEQUÍA ANALIZADA	VARIABLES A UTILIZAR EN LA OBTENCIÓN DE ÍNDICES DE VULNERABILIDAD A LAS SEQUÍAS													
		P	T	H	V. ALM.	Q	N	NAF	EVAPOTRANSPIRACIÓN						
									CUL	R	H.R.	V.V.	I.M.	R.S.R.	
Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica	Meteorológica	✓													
Número de días con precipitación mayor de 30 mm	Meteorológica	✓													
Período de retorno de la precipitación máxima diaria	Meteorológica	✓													
Índice USBR de la Sequía	Hidrológica	✓	✓		✓	✓	✓								
Índice de Aridez de Palfai	Meteorológica	✓	✓					✓							
Índice de Potencial Agro hidrológico	Hidrológica/		✓						✓						
Índice de Evapotranspiración Medio o Medio Normal	Agronómica		✓						✓						
Índice de Evapotranspiración Medio	Agronómica		✓						✓	✓	✓	✓			
Deciles	Meteorológica	✓													
Índice de Aridez	Meteorológica	✓	✓								✓	✓	✓		
Índice de repetitividad de Sequía	Meteorológica	✓													
Indicativo Integrado de Sequía: Mapa de Riesgo de Sequía	Meteorológica	✓	✓								✓	✓	✓		
Índice de Vegetación Diferencia Normalizada	Meteorológica/								✓						✓
Índice de Humedecimiento Modificado	Meteorológica/	✓		✓					✓						

Fuente: Elaboración propia.

Las variables mostradas en la **Tabla 8** son las siguientes:

P	Precipitación	CUL.	Tipos de cultivos
T	Temperatura	R	Radiación
H	Humedad del suelo	H.R.	Humedad Relativa
V. ALM.	Agua almacenada en vasos	V.V.	Velocidad del viento
Q	Caudal de ríos	I.M.	Insolación media
N	Masa de nieve	R.S.R.	Radiación con sensores remotos
N.A.F.	Nivel de Agua Freática		

La utilización de estos indicadores depende de múltiples factores entre los cuales se destacan la disponibilidad de datos y el alcance del análisis que se pretenda realizar.

En México la posibilidad de aplicar algunos de los índices mostrados arriba resulta nula por no contar con la información óptima para la aplicación correcta de los mismos, sin embargo existen una diversidad de trabajos donde se han evaluado algunos de los índices mostrados obteniendo los siguientes resultados.

En el documento “Evaluación de índices de sequía en las cuencas de afluentes del río Bravo”, (Aparicio & Velasco, 2004) se explica la importancia de examinar con detalle

la aplicabilidad y características de los métodos para determinar sequías. En ese trabajo se muestran la aplicación del SPI (Standart Precipitacion Index) y el PSDI (Palmer Severity Drought Index) con el objeto de comparar su comportamiento aplicado en la cuenca del río Conchos y el río Pecos.

En el trabajo se concluye que ambos métodos tienen un comportamiento similar sobre todo cuando el PSDI se compara con el SPI a escala anual, y en ambos casos resulta que la cuenca del río Conchos, durante los últimos años hasta 2001, se han presentado condiciones de sequía y déficit de agua. Otra conclusión de dicha investigación es que el PSDI es muy susceptible en sus parámetros utilizados para determinar la capacidad de campo global, lo cual puede producir resultados imprecisos lo que limita su aplicación ante la falta de información y ante la estimación de algunos parámetros de la cuenca.

Otra investigación hecha sobre la comparación de diferentes índices de sequía se realizó y público mediante el artículo “Análisis de índices de sequía, para las cuencas transfronterizas de los ríos Bravo y Colorado” (Arreguín, López, Velásquez, & López, 2013) en el que se evalúan las metodologías del SPI y el SDI (Stream Drought Índice) para caracterizar la sequía en la cuenca de los ríos mencionados.

Como conclusión de dicha investigación se obtiene que ambos métodos son buenos para la estimación de la existencia y grado de una sequía, sin embargo debido a su naturaleza difieren en los grados y ocurrencia del fenómeno.

El hecho de que no coincidan los años de ocurrencia de sequía del SDI con los del SPI puede deberse, entre otras causas, al efecto de la capacidad de regulación del sistema hidráulico y al impacto del deshielo sobre el escurrimiento (Arreguín, López, Velásquez, & López, 2013).

Finalmente existe otro artículo “Análisis de la sequía meteorológica en el norte de México” (Escalante & Reyes, 2012) en el que se propone el uso de un índice llamado lamina de lluvia disponible en déficit, H_{p10} , el cual puede obtenerse al ajustar las distribuciones de probabilidad para mínimos a la serie de lluvias anuales acumuladas.

Dicho índice pretende determinar la aportación real de la precipitación para evitar que los almacenamientos superficiales y subterráneos se sobreexploten en los casos en que no se presente la lluvia media anual en un año en particular.

Todas las metodologías anteriores son válidas para la obtención de las características de una sequía sin embargo, su uso dependerá de la información disponible en la cuenca y del tipo de sequía que se pretenda analizar.

3.3 MONITORES DE SEQUÍA.

La vigilancia de las sequías se ha convertido en una parte integral de la planeación, preparación y mitigación de los efectos de la sequía a nivel nacional, regional y local. En la actualidad con el empleo de diversas tecnologías, se han desarrollado algunas herramientas que monitorean el desarrollo de una sequía haciendo uso de metodologías establecidas, permitiendo de esta forma dar seguimiento al desarrollo y a las características principales de una sequía. A continuación se presentan algunos de los monitores de sequía que existen en la actualidad así como su funcionamiento.

Global Drought Monitor.

Es un sistema de monitoreo de sequías creado por Benjamín Lloyd-Hughes y Mark Saunders, en el año 2007 en el cual se proporciona el panorama general de sequía en una escala espacial de 100 km, en la página del UCL DEPARTMENT OF SPACE AND CLIMATE PHYSICS. Los mapas no están diseñados para representar las condiciones locales o para sustituir a las advertencias de sequía y avisos emitidos por los gobiernos locales o regionales. Las entidades locales y regionales pueden monitorear una sequía con diferentes indicadores que los utilizados en el Monitor de Sequía Global (ver *Figura 23*). Estos indicadores pueden ser mejor adaptados para atender las necesidades y problemas locales específicos. Como consecuencia, podría haber escasez de agua o malas cosechas en un área no designada con sequía, así como puede haber lugares con suministro adecuado de agua en un área designada con sequía.

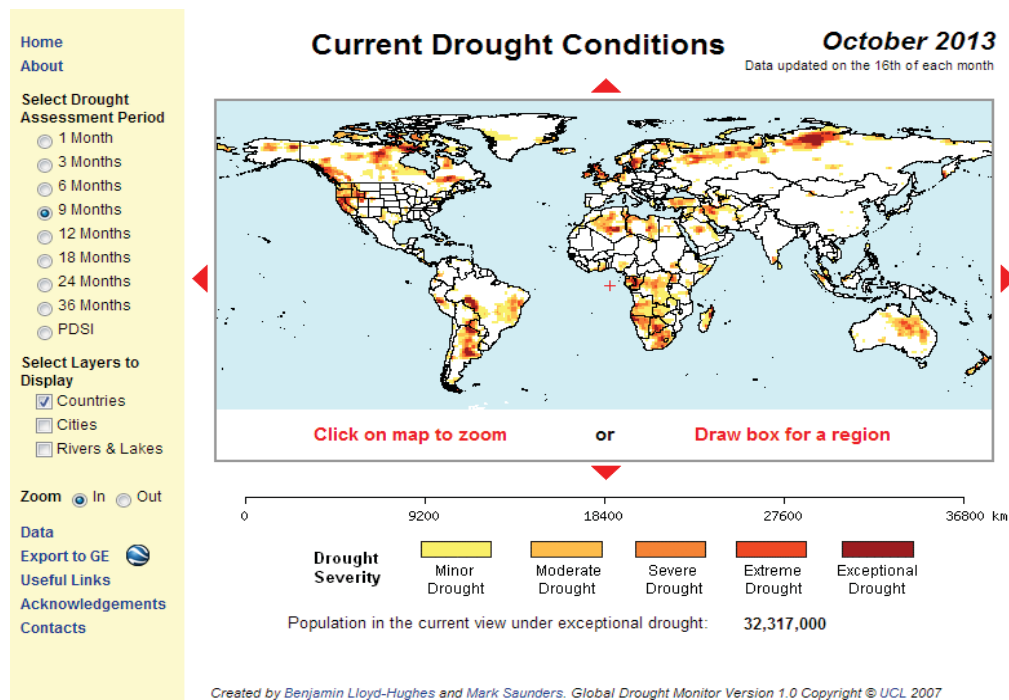


Figura 23 Interface del Global Drought Monitor.

Fuente: UCL, 2013.

Como fuentes de información utiliza datos de precipitación, temperatura, capacidad de retención de agua del suelo, mapas base, redes hidrográficas y población. Los indicadores que utiliza para generar las zonas con sequía son el SPI para 1, 3, 6, 9, 12, 18, 24 y 36 meses y el PSDI, los cuales con base en la información que utiliza, proporciona a nivel global las zonas con sequía así como su severidad y da una estimado de la población que padece dicho evento extremo.

Este monitor clasifica en diversos grados la severidad con que se presenta una sequía tomando como base los resultados del SPI y del PSDI. Dicha clasificación así como sus posibles efectos se presentan en la Figura24.

Grado de severidad	Periodo de retorno	Descripción de los posibles impactos.	Índices de monitoreo de sequía		
			SPI	Categoría	PSDI
Sequía Menor	3 a 4	Introducción a una sequía; sequedad a corto plazo causando crecimiento lento de granos y pastos; riesgo de incendios; ligeros déficits de agua; pastos y granos no totalmente recobrados.	-0.5 a -0.7	D0	-1.0 a -1.9
Sequía Moderada	5 a 9	Algunos daños a los pastos y a los granos; alto riesgo de incendios; ríos, almacenamientos o pozos bajos; escases de agua en desarrollo o inminente; restricciones en el uso del agua.	-0.8 a -1.2	D1	-2.0 a -2.9
Sequía Severa	10 a 17	Perdida probable de pastos y granos; riesgo de incendios muy alto; desabasto general del agua; restricciones impuestas del uso del agua.	-1.3 a -1.5	D2	-3.0 a -3.9
Sequía Extrema	18 a 43	Mayores pérdidas en granos y pastos; peligro extremo por incendios; restricciones o desabasto de agua extendido.	-1.6 a -1.9	D3	-4.0 a -4.9
Sequía Excepcional	44	Pérdidas excepcionales y extendidas de granos y pastos; riesgo excepcional de incendios; desabasto de almacenamientos de agua, ríos y pozos creando emergencia hídrica.	Menor que -2	D4	-5 o menor

Figura24 Grados de severidad del Monitor de Sequía Global.

Fuente: UCL, 2013.

North American Drought Monitor

El Monitor de Sequía de América del Norte (NADM) es un esfuerzo de cooperación entre los expertos de sequía en Canadá, México y Estados Unidos para monitorear la sequía en todo el continente de forma permanente. Se basa en el Monitor de Sequía de Estados Unidos (USDM), y como tal, está siendo desarrollado para proporcionar una evaluación global e integrada de la sequía en curso a lo largo de los tres países.

No hay una manera correcta para medir la sequía. Los índices de sequía se utilizan para detectar y medir las sequías, pero los diferentes índices dan medida de la sequía en diferentes maneras, y un sólo índice no funciona en todas las circunstancias (Heim, 2002).

El concepto de Monitor de Sequía fue desarrollado en forma conjunta por el Servicio Meteorológico Nacional, el Centro Nacional de Mitigación de la Sequía y el Departamento de Conjunto Fondo Clima Agrícola de Agricultura a finales de 1990 en

Estados Unidos como un proceso que sintetiza múltiples índices, perspectivas e impactos locales, en un evaluación que mejor represente las condiciones de sequía actuales. El resultado final de cada monitor de sequía es un consenso de los científicos federales, estatales y académicos. Los principales participantes de Estados Unidos en el programa NADM incluyen Centro Nacional de Datos Climáticos de la NOAA, el Centro de Predicción Climática de la NOAA, el Departamento de Agricultura de EE.UU., y el Centro Nacional de Mitigación de la Sequía. Los principales participantes en Canadá y México incluyen la Agricultura y Agroalimentación Canadá, el Servicio Meteorológico de Canadá, y el Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN).

Los insumos utilizados en el monitoreo y evaluación de la sequía con la metodología del Monitor de Sequía de América del Norte se integra mediante los siguientes componentes.

Índice de Precipitación Estandarizado.

El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) cuantifica las condiciones de déficit o exceso de precipitación, para un lapso de tiempo determinado. Se manejan diferentes escalas de tiempo (ver Figura25).

Los más comunes son SPI-3, SPI-6, SPI-9 e incluso SPI-12. Este valor es calculado en el Centro Nacional de Datos Climáticos de la NOAA (NOAA-NCDC) con datos de lluvias de estaciones y del SMN-Conagua, también existe un cálculo interno dentro del SMN.

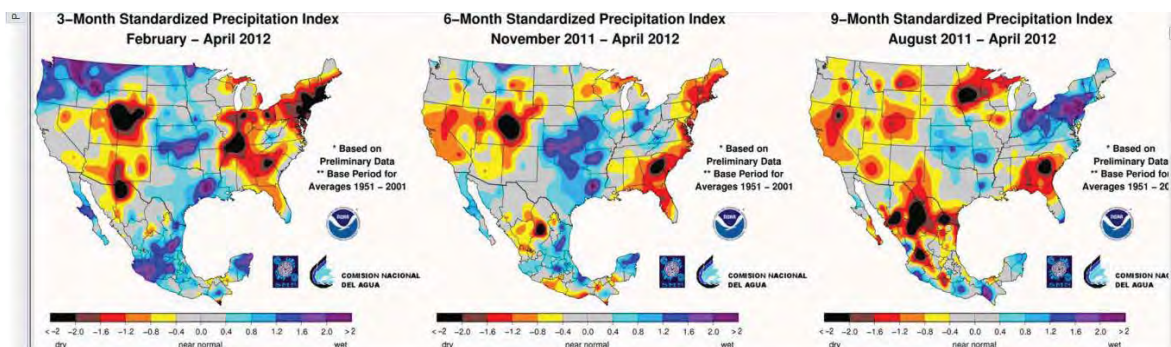


Figura25 SPI calculado para el NADM.
Fuente: SMN, 2013.

Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (PSDI).

Estima la capacidad de agua disponible, a través de un balance hidrológico, el cual se calcula a partir del contenido de agua del suelo, la evapotranspiración Potencial (ETP) y los datos de lluvias. Se utilizan tres variantes Palmer, Palmer Hidrológico y Palmer Z.

Es calculado en el Centro Nacional de Datos Climáticos de la NOAA (NOAA-NCDC) con datos de lluvias y temperaturas de estaciones del SMN-Conagua (ver Figura 26)

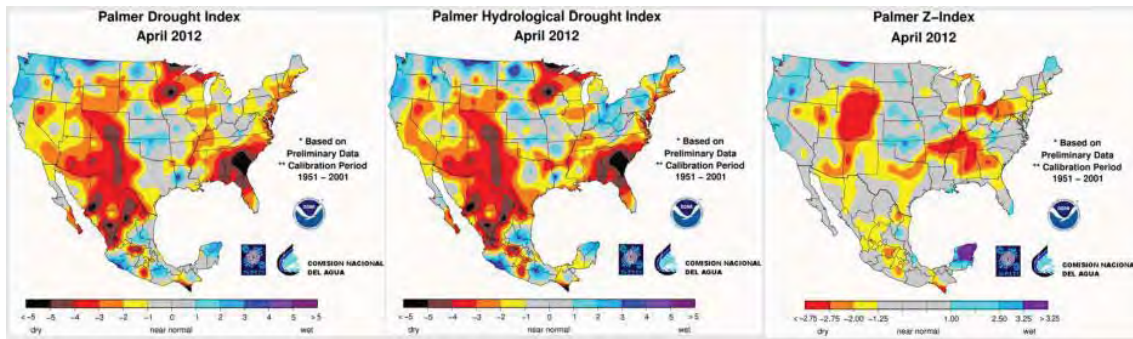


Figura 26 Índice de severidad de Palmer calculado para el NADM.
Fuente: SMN, 2013.

Porcentaje de precipitación Normal.

Es la anomalía de lluvia en base al porcentaje del normal. Maneja varias escalas de tiempo, los más usuales 3, 6 y 12 meses. Es calculado en el Centro Nacional de Datos Climáticos de la NOAA (NOAA-NCDC) con datos de lluvias de estaciones del SMN-Conagua, también existe un cálculo interno en el SMN (ver Figura 27).

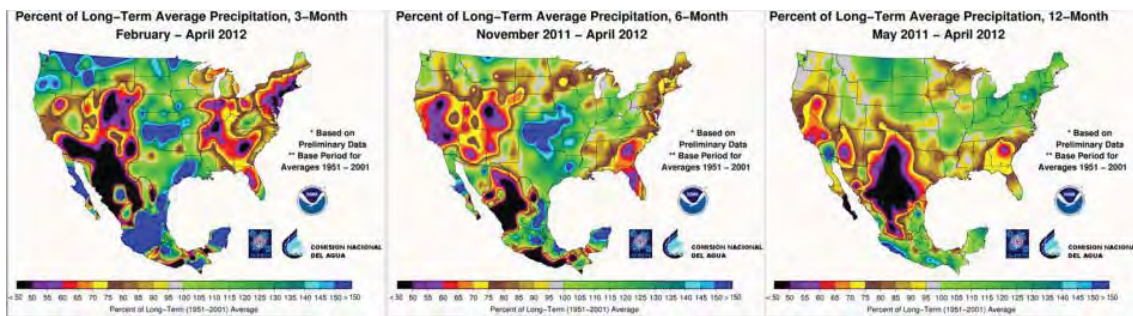
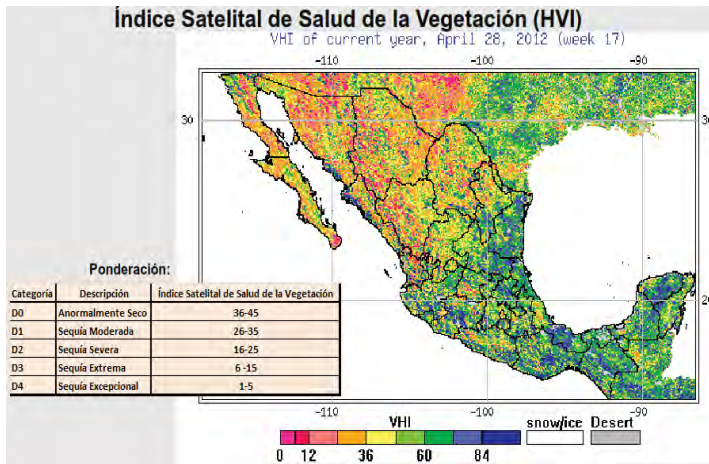


Figura 27 Porcentaje de precipitación normal calculado para el NADM.
Fuente: SMN, 2013.

Índice Satelital de Salud de la Vegetación (HVI).

Producto derivado de percepción remota que mide el grado de estrés de la vegetación producto de la carencia o exceso de agua o la temperatura, entre otros. Si el índice indica tiene valores menores a 40 indica diferentes niveles de estrés, es posible la pérdida en los cultivos o la producción de pastos.



Cuando el índice indica valores mayores a 60 (condición favorable) se puede esperar una producción plena. Calculado en el Centre for Satellite Applications and Research (STAR-NESDIS) de la NOAA (ver Figura28).

Figura28 Índice satelital de salud de la vegetación.
Fuente: SMN, 2013.

Modelo de Humedad del Suelo Leaky Bucket CPC-NOAA

Estima la humedad del suelo mediante un modelo hidrológico de una capa. El modelo utiliza la precipitación y la temperatura para calcular humedad del suelo, evaporación y escurrimientos. La evaporación potencial se estima mediante la temperatura. El origen de este modelo es el modelo de Humedad del Suelo Leaky Bucket (ver Figura29) obtenido en el Centro de Predicción del Clima (CPC-NOAA).

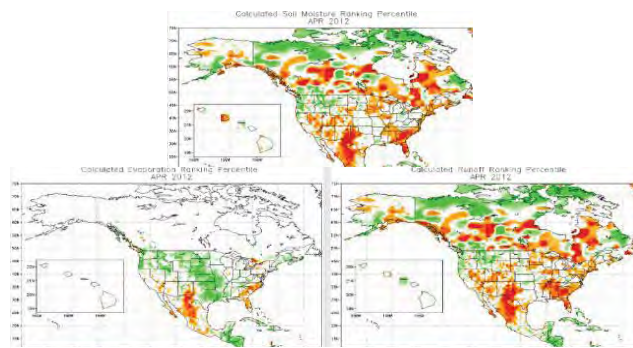


Figura29 Modelo de humedad del suelo Leaky.
Fuente: SMN, 2013.

Asimismo hace uso de las anomalías en porcentaje de lluvia (ver Figura30).

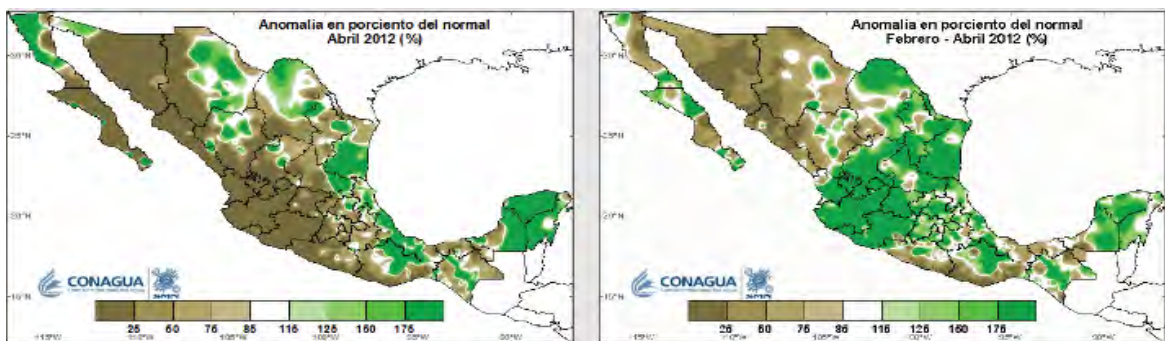


Figura30 Anomalia de lluvias a 1 y 3 meses.
Fuente: SMN, 2013.



Figura31 Mapa de estado de llenado de presas GASIR.
Fuente: SMN, 2013.

La Gerencia de Aguas Superficiales de la CONAGUA (GASIR) con información del estado de llenado de las principales presas del país realiza un cálculo del porcentaje de almacenamiento, obteniendo de esta manera un mapa donde se identifican las principales presas así como el estado en que se encuentran de llenado tomando como unidad el porcentaje (ver Figura31).

Finalmente con la mezcla de las capas anteriores mediante una plataforma GIS (ver Figura32) se obtiene un mapa que mediante análisis y discusión da lugar a un mapa final obtenido por consenso (ver Figura33).

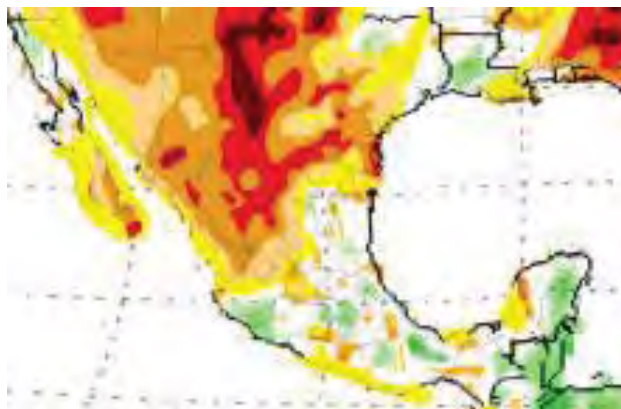


Figura32 Cruce de información mediante la plataforma GIS para obtención de mapas del NADM.
Fuente: SMN, 2013.

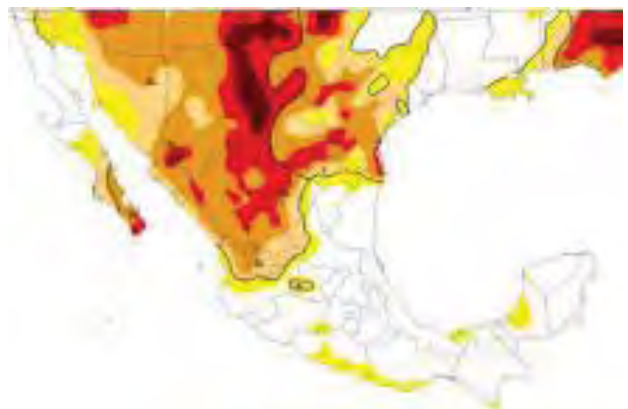


Figura33 Consenso y obtención de mapas del NADM.
Fuente: SMN, 2013.

Este monitor de igual forma maneja una clasificación para identificar el tipo de sequía que se presenta. Dicha clasificación se presenta en la Figura34.

Clasificación de la severidad de la sequía								
Categoría	Descripción	Posibles impactos	Rangos					
			índice de Palmer	CPC Modelo de humedad del suelo (Percentiles)	USGC escurrimiento semanal (Percentiles)	Porcentaje de precipitación normal	SPI	índice de salud de la vegetación
D0	Anormalmente seco	Introducción a una sequía; sequedad a corto plazo causando crecimiento lento de granos y pastos; riesgo de incendios; ligeros déficits de agua; pastos y granos no totalmente recobrados.	-1.0 a -1.9	21-30	21-30	<75% por 3 meses	-0.5 a -0.7	36-45
D1	Sequía Moderada	Algunos daños a los pastos y a los granos; alto riesgo de incendios; ríos, almacenamientos o pozos bajos; escases de agua en desarrollo o inminente; restricciones en el uso del agua.	-2.0 a -2.9	11-20	11-20	<70% por 3 meses	-0.8 a -1.2	26-36
D2	Sequía Severa	Perdida probable de pastos y granos; riesgo de incendios muy alto; desabasto general del agua; restricciones impuestas del uso del agua.	-3.0 a -3.9	6-10	6-10	<65% por 6 meses	-1.3 a -1.5	16-25
D3	Sequía Extrema	Mayores pérdidas en granos y pastos; peligro extremo por incendios; restricciones o desabasto de agua extendido.	-4.0 a -4.9	3-5	3-5	<60% por 6 meses	-1.6 a -1.9	6-15
D4	Sequía Excepcional	Pérdidas excepcionales y extendidas de granos y pastos; riesgo excepcional de incendios; desabasto de almacenamientos de agua, ríos y pozos creando emergencia hídrica.	-5 o menor	0-2	0-2	<65% por 12 meses	Menor que -2	1-5

Figura34 Grados de severidad del NADM.

Fuente: SMN, 2013.

Existen algunos otros monitores del fenómeno de la sequía como el Drought Watch (Canadá), el Drought Monitoring Center (África), o el Monitor de sequía de China construido por la Administración Meteorológica de China entre otros. A continuación se mencionan algunos monitores que existen a nivel mundial para el seguimiento del fenómeno de la sequía.

Australia Rainfall Deciles Maps
 Australian Water Availability Project
 Canada Drought Watch - Current Conditions and Drought
 European Drought Observatory: Drought Products
 Famine Early Warning Systems (FEWS) Network
 GEO Global Drought Monitoring website
 Global Drought Monitor
 Global Information and Early Warning System (GIEWS)
 Global SPEI
 International Research Institute (IRI): Map Room
 IRI: Global SPI Analysis
 NOAA: Regional Climate Maps
 North American Drought Monitor
 Water and the Land: Australia

Asimismo con los sistemas de percepción remota se han implementado algunos sistemas de alerta temprana, lo cual ayuda a prepararse para la ocurrencia de una sequía.

Algunos de los sistemas de alerta temprana se basan principalmente en las siguientes etapas:

Observación. Cuando se observa a corto plazo que una precipitación es deficiente.

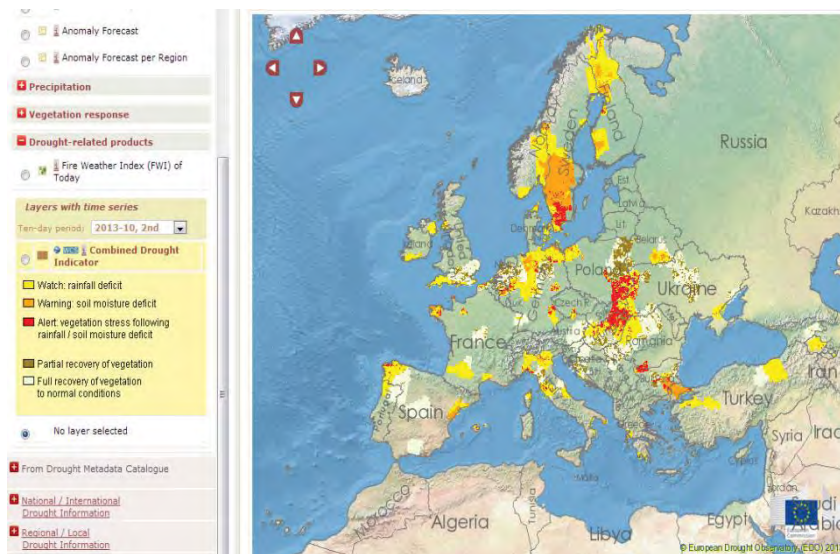
Peligro. Cuando esta precipitación deficiente repercute y genera anomalías en la humedad del suelo.

Alerta. Cuando estas dos condiciones están acompañadas por una anomalía en la condición de vegetación.

El European Drought Observatory incluye las zonas donde existen asentamientos humanos o producción de algún tipo y generan boletines que previenen del desarrollo de una sequía y de sus posibles efectos (ver Figura35).

A continuación se presentan algunos de los sistemas de percepción remota que operan en el mundo.

European Drought Observatory: Drought Products
Famine Early Warning Systems (FEWS) Network
NCDC: Special Sensor Microwave/ Imager (SSM/I)
Southwest Asia Drought Monitor



En especial el Special Sensor Microwave, es una herramienta que proporciona imágenes mediante sensor de microondas que generan información como lluvia, cantidad de agua líquida en las nubes, Cobertura de nieve y Agua total precipitable.

Figura35 Visor del European Drought Observatory.
Fuente: (European Drought Observatory, 2013)

3.4 BIOÍNDICADORES DE SEQUÍA.

Se han desarrollado algunas investigaciones acerca del uso de factores ambientales en plantas y animales para la reconstrucción de sequías pasadas e incluso para la predicción de sequía en algunas zonas del mundo.

El primer bioindicador de sequía es mediante la **reconstrucción de periodos de sequía meteorológica** con base en el estudio de 835 anillos de árboles (ver Figura37). En el Atlas de sequía de América del Norte (ver Figura36) publicado por el National

Climatic Data Center de la National Oceanic and Atmospheric Administration en su área de paleoclimatología se presentan los resultados del estudio de 835 árboles distribuidos en América del Norte.

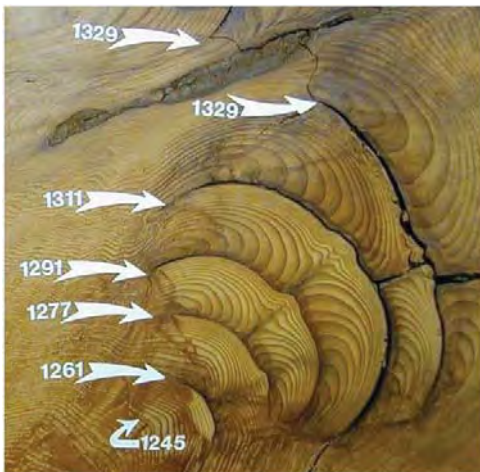


Figura37 Lecturas de datos del clima en anillos de árboles.

Fuente: (Thomas, 2009)

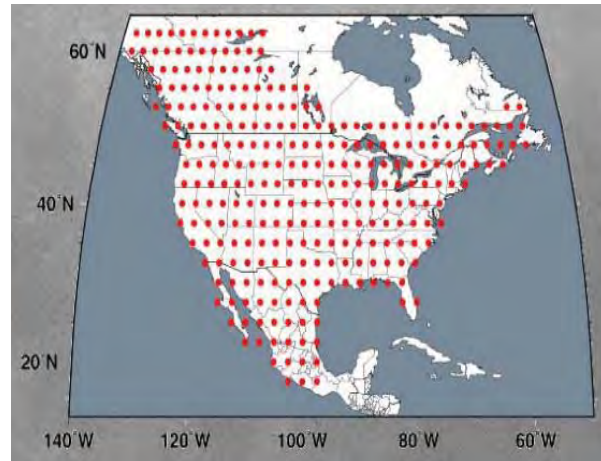


Figura36 Atlas de sequía de América del Norte, reconstrucción de sequías mediante anillos de árboles.

Fuente: (NSF, 2013)

El Banco Internacional de Datos Tree-Ring (ITRDB) es el mayor archivo del mundo de los datos de anillos de árboles, gestionado por la Sección Paleoclimatología del CNDC y el Centro Mundial de datos sobre paleoclimatología. El ITRDB incluye datos como el ancho original del anillo, densidad de la madera, las mediciones de isótopos, y el índice de crecimiento del sitio cronologías. Más de 3,000 sitios en seis continentes están incluidos. Los especialistas han llamado a esta ciencia Paleoclimatología.

La malla generada por el Monitor de sequía de América del Norte utilizada para la reconstrucción climática tiene una resolución de 2.5 grados de latitud x 2.5 grados de longitud. La red se compone de 286 puntos abarcando la mayor parte de América del Norte.

SEQUÍA RECONSTRUIDA MEDIANTE ANILLOS DE ARBOLES
 PUNTO: 164 100.0 O 35.0 N

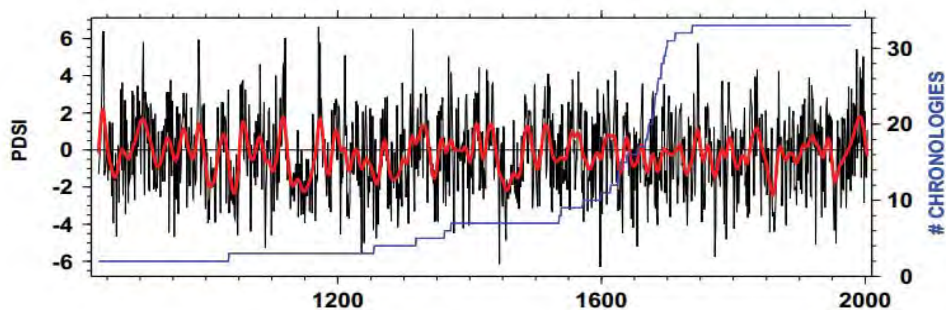


Figura38 Evaluación del Índice de severidad de sequía de Palmer para la Est. 164.
 Fuente: (NSF, 2013)

La reconstrucción de los grados de sequía se realizó mediante análisis a los anillos de árboles y equiparados con el Índice de Severidad a la Sequía de Palmer PSDI como se parecía en la *Figura38*. Los resultados de dicho estudio se encuentran publicados en la página de la NOAA Paleoclimatology, publicando mapas como el de la *Figura39*.

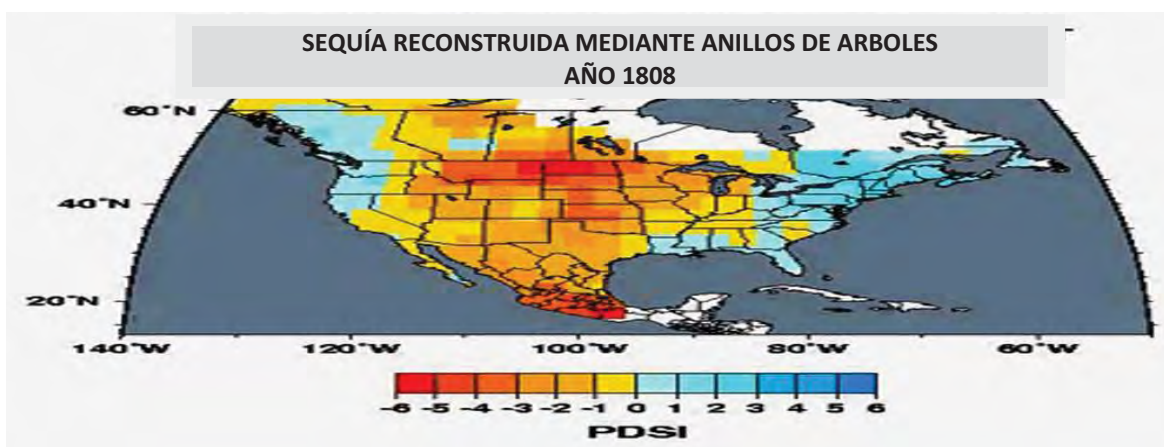


Figura39 Mapa de reconstrucción climática mediante el índice de severidad de sequía de Palmer para el año 1808.
 Fuente: (NSF, 2013)

Otro bioindicador que ha sido motivo de estudio es el **comportamiento de la flora y la fauna silvestre**. En el artículo de investigación “Conocimientos de los campesinos andinos sobre los predictores climáticos: Elementos para su verificación”, (Claverías, 1990) se detalla como mediante conocimiento empírico se puede determinar si un determinado año será bueno para las cosechas.

Los factores que usan para las predicciones se dividen en tres:

Fitoindicadores. Mediante el comportamiento de algunas plantas los campesinos de la zona de los andes pueden predecir si será un año favorable para las cosechas o no mediante el crecimiento y desarrollo de algunas especies.

Zooindicadores. A través del comportamiento de aves pueden predecir si será un año de lluvias o no como por ejemplo, se fijan en la distancia de sus nidos al lago Titicaca o en el tamaño del nido, pues si el ave construye su nido cerca del lago indica que se esperan niveles bajos y en consecuencia sequías. Otro bioindicador es el aullido y excremento del zorro, el color y cantidad de sapos, o el tamaño de las colas de las lagartijas. Todos los mencionados tomados como indicadores de abundancia o escases de lluvia.

Indicadores astronómicos y fenómenos meteorológicos. Los campesinos observan el brillo de las estrellas, las fechas de su aparición, sus movimientos, direcciones y desaparición. Con esas observaciones también pueden predecir las heladas. También toman en cuenta el color y movimientos de la luna, prediciendo si las lluvias se adelantarán o atrasarán. La dirección, velocidad y temperatura de los vientos en determinados meses y días presagian sequías, lluvias o heladas de acuerdo a los campesinos andinos.

En el estudio se evaluaron las predicciones de un cierto número de campesinos para dos campañas agrícolas 1989-90 y 1990-91 obteniendo los siguientes resultados.

Respecto a la campaña agrícola 1989-90:

En 1989, de los 32 campesinos entrevistados, el grado de acierto es de 70.37% (predijeron que sería un año de sequía) y el grupo de campesinos con predicción errónea fue de 29.63% (22.22% de campesinos que predijeron un año regular o casi “seco” y 7.40% que predijeron que el año iba a ser normal o lluvioso).

Respecto a la campaña 1990-91:

Después que transcurrió esta campaña agrícola (entre diciembre de 1990 y abril de 1991) fue caracterizada por los productores y las entidades públicas como un año regular, sin sequía, de regular precipitación pluvial (con menos lluvias que lo normal, pero también menos heladas que el año anterior).

Es decir, los resultados en la realidad fueron muy semejantes a la predicción climática que hicieron la mayoría de los campesinos entrevistados: 80%, sin incluir a los que aún no se decidieron a predecir. Es decir, que este resultado alienta la necesidad de tomar muy en cuenta y en serio la necesidad de que se elaboren metodologías para la recolección y análisis de indicadores naturales que predigan el clima.

4. MEDIO FÍSICO Y ESTADÍSTICAS EN LA REGIÓN.

Este capítulo contiene un estudio del medio físico, económico y social de la región hidrológica administrativa Río Bravo tomando en cuenta las condiciones que rigen la región del lado Mexicano y respetando los acuerdos realizados con el gobierno de los Estados Unidos de América.

Los objetivos que se persiguen en este capítulo son dos:

El primero consiste en conocer las características y problemáticas que actualmente se presentan en la región hidrológica administrativa VI Río Bravo.

El segundo es definir las principales problemáticas ambientales, económicas y sociales que existen en la región.

En los primeros 8 subcapítulos se realiza una breve descripción de la situación hidrológica y económica de la región hidrológica administrativa. Finalmente en el subcapítulo 9 se abordan las principales problemáticas de la región y se proponen algunas alternativas para mitigar los efectos de las sequías.

En México existen 13 regiones hidrológico-administrativas. La zona de estudio es la región hidrológica administrativa VI Río Bravo la cual tiene como principal aportador de escurrimiento al río con el mismo nombre y que sirve de límite entre México y Estados Unidos, registrando un escurrimiento medio anual en territorio mexicano de 6,857 hm³ anuales (CONAGUA, 2011).

La RHA VI Río Bravo cubre una superficie total de aproximadamente 388,848 km²; Con sus 3,034 km, el río Bravo/Grande es el más largo de México y forma la mayor cuenca del país; asimismo es el cuarto río más largo de EUA y quinto de América del Norte (Jurgen, 2011)

La cuenca del río Bravo/Grande abarca parte de ocho estados; tres del lado estadounidense: Colorado,

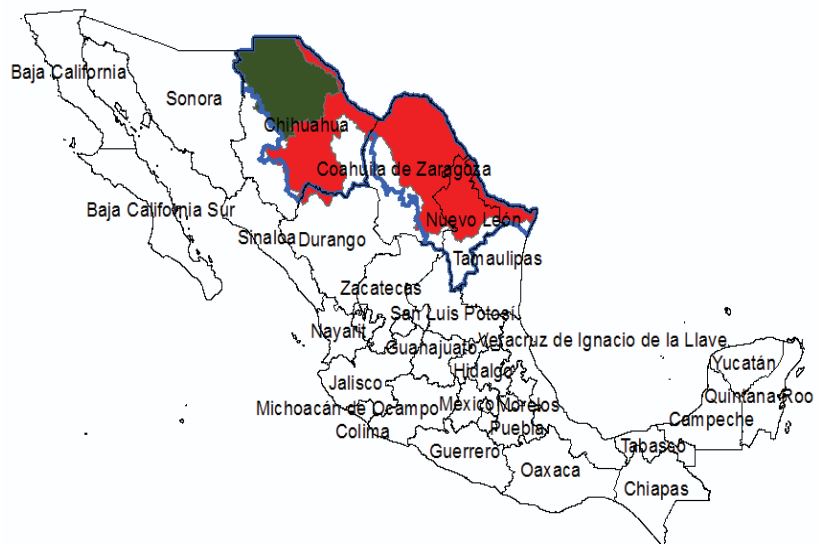


Figura40 Zona de estudio de sequía. RHA VI
Fuente: (CONAGUA, 2013)

Nuevo México y Texas; y cinco del lado mexicano: Durango, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. La RHA Río Bravo se compone por la RH 24 Río Bravo (marcada en color rojo) y la RH 34 Cuencas cerradas del norte (en color verde). Para el presente trabajo de investigación el área de análisis corresponderá a la RHA VI Río Bravo (remarcando su contorno en azul). Esta región ha tenido actualizaciones administrativas que ha realizado la Conagua ya que en abril de 2010, se transfirieron a la RHA VI los municipios de Galeana, Dr. Arroyo, Mier y Noriega, y Zaragoza para administrar el estado de Nuevo León en su totalidad y se quitó el municipio de Ocampo estado de Durango, como se parecía en la *Figura40*.

En Estados Unidos de América, el afluente más importante del río Bravo es el río Pecos, mientras que en México los afluentes más importantes son los ríos Conchos, Salado y San Juan.

La región hidrológica administrativa río Bravo es la cuarta región de trece en México que poseen mayor volumen de agua concesionada para uso consuntivo por la Comisión Nacional del Agua con 9,243 millones de m³. Esta cuenca cuenta con el

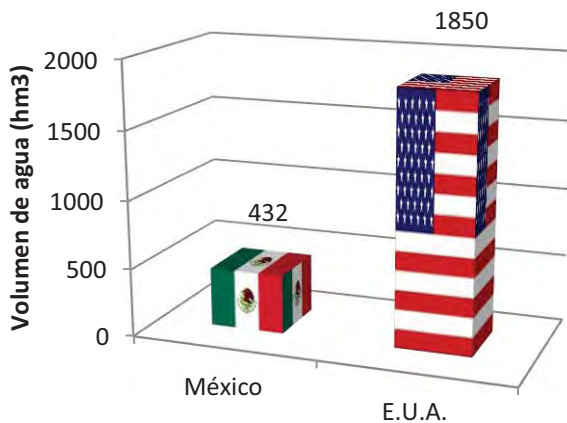


Figura41 Distribución de agua superficial proveniente del río Bravo entre México y EUA
Fuente: (CONAGUA, 2011)

mayor número de títulos de concesión otorgados en el país, 6,500 para aguas superficiales y 36,500 para aguas subterráneas (CONAGUA, 2011).

La distribución de las aguas superficiales del río Bravo/Grande entre EUA y México, quedó establecida mediante la firma de los gobiernos federales de ambos países, en la Convención de 1906 para el tramo de Ciudad Juárez a

Forth Quitman, Texas y con el Tratado de 1944 para el tramo Forth Quitman al Golfo de México. En síntesis, México debe entregar a los Estados Unidos de América 431.2 hm³ de agua en promedio anual en ciclos de cinco años de los ríos Conchos, Arroyo de la Vacas, San Diego, San Rodrigo, Río Escondido y Río Salado. En contraparte, Estados Unidos debe entregar a México 1 mil 850 hm³ de agua del río Colorado de la presa Imperial en California. Es decir, México recibe más de cuatro veces la cantidad de agua que aporta a su país vecino, por lo cual se estima que el balance resulta beneficioso para México como se aprecia en la *Figura41*.

4.1 MEDIO FÍSICO.

Para estudiar y comprender las problemáticas de sequía que se presentan en la RHA Río Bravo es importante en primera instancia conocer su medio físico para tener una visión del origen y de las condiciones naturales de la zona. Para esto se definirán las características más importantes en la región que nos permitan conocer la situación actual de la cuenca para comprender esta importante y extensa región del país.

Topografía.

Su configuración topográfica está formada principalmente por extensas planicies en forma de altiplanos, alcanzando elevaciones de hasta 3,000 msnm en la parte occidental, En la parte central de la región y occidente se encuentran montañas y lomeríos correspondientes a las sierras madre oriental y occidental respectivamente (ver *Figura42*).

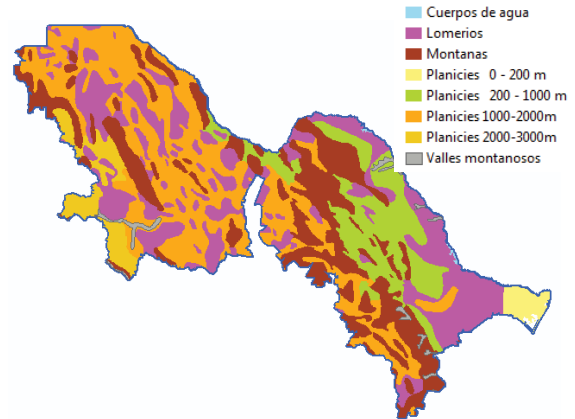


Figura42 Descripción topográfica de la RHA VI.
Fuente: (CONABIO, 2012)

Clima.

En la *Figura43* se presentan los diferentes tipos de clima de la RHA VI de acuerdo a la clasificación de Koppen modificada por García, en él se aprecia que la mayor parte del territorio tiene climas áridos yendo desde los cálidos hasta los semifríos. Las condiciones

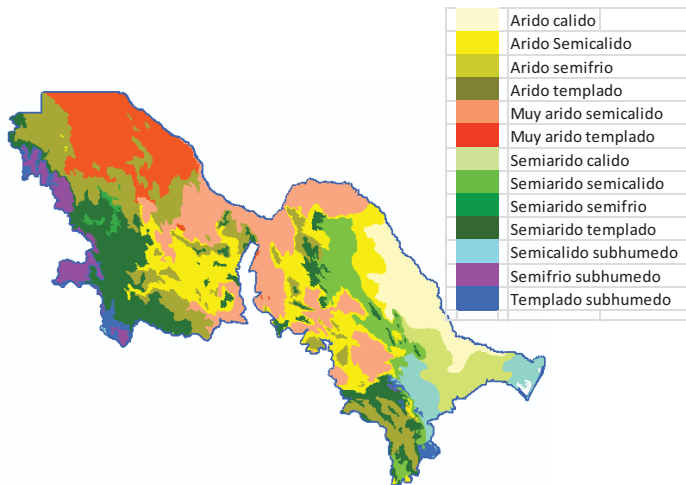


Figura43 Climas predominantes de la RHA VI.
Fuente: (CONABIO, 2012)

semifrías y templadas coinciden con la zona montañosa de Chihuahua.

Condiciones de humedad.

En su mayoría la región es Árida con pocas extensiones subhúmedas, esto confirma las condiciones de poca humedad que de manera natural imperan en la región. (Ver *Figura44*).

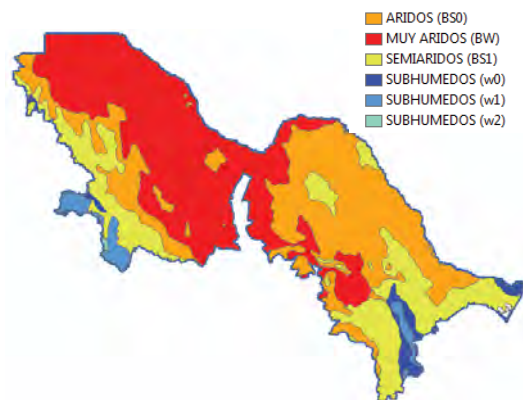


Figura44 Condiciones de humedad de la RHA VI.
Fuente: (CONABIO, 2012)

Vegetación y uso del suelo.

El uso del suelo en la cuenca es muy variable, sin embargo como se aprecia en la *Figura 45* en la parte Poniente predominan los bosques teniendo una zona de transición de pastizales naturales, en la zona central y mayor parte de la región predominan los matorrales con algunas zonas importantes de pastizales naturales y zonas de chaparral. En la parte Noroeste se aprecia una pequeña parte de vegetación desértica y en la parte costera se aprecian importantes zonas de agricultura así como en la parte Occidental.

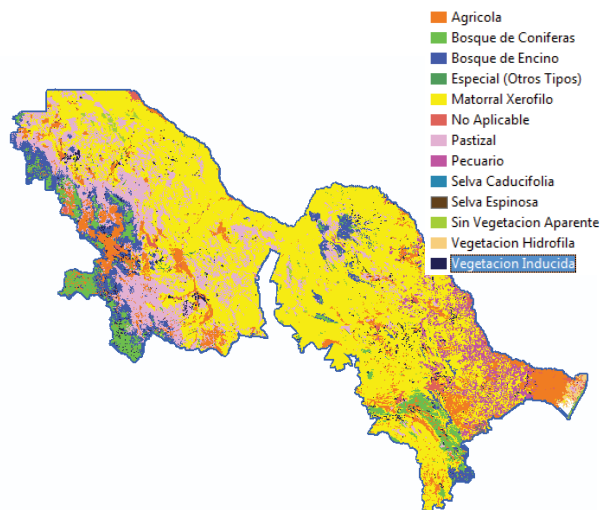


Figura 45 Uso del suelo de la RHA VI.

Fuente: (CONABIO, 2012)

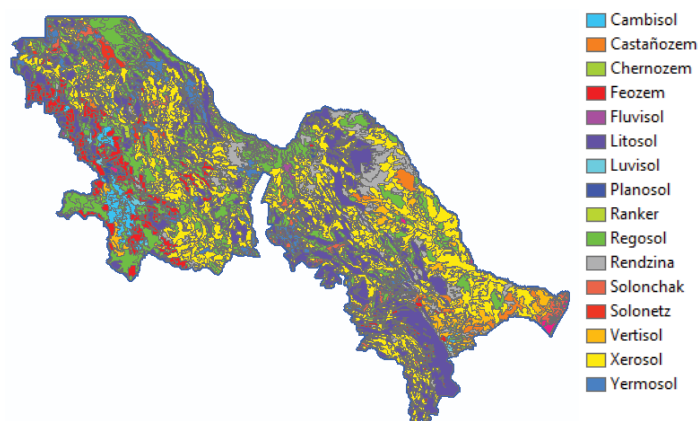


Figura 46 Tipos de suelos de la RHA VI.

Fuente: (CONABIO, 2012)

semiáridos como se aprecia en la *Figura 46*.

De acuerdo a las condiciones climáticas, de uso del suelo y de edafología se observa que la mayor parte de la región corresponde a zonas secas y semisecas, a excepción de las zonas al extremo Este y Oeste donde se aprecia un incremento en la humedad.

Suelos.

En cuanto a la configuración de sus suelos la mayoría del territorio está configurado por suelos tipo Xerosol que son suelos secos, Planosol que son suelos en llanos y propios de climas semiáridos, regosol que son en general suelos claros y con poco contenido orgánico y también se tienen en la parte oeste suelos Feozem que son suelos oscuros y ricos en materia orgánica. En general los suelos de la región son secos o

Precipitación media.

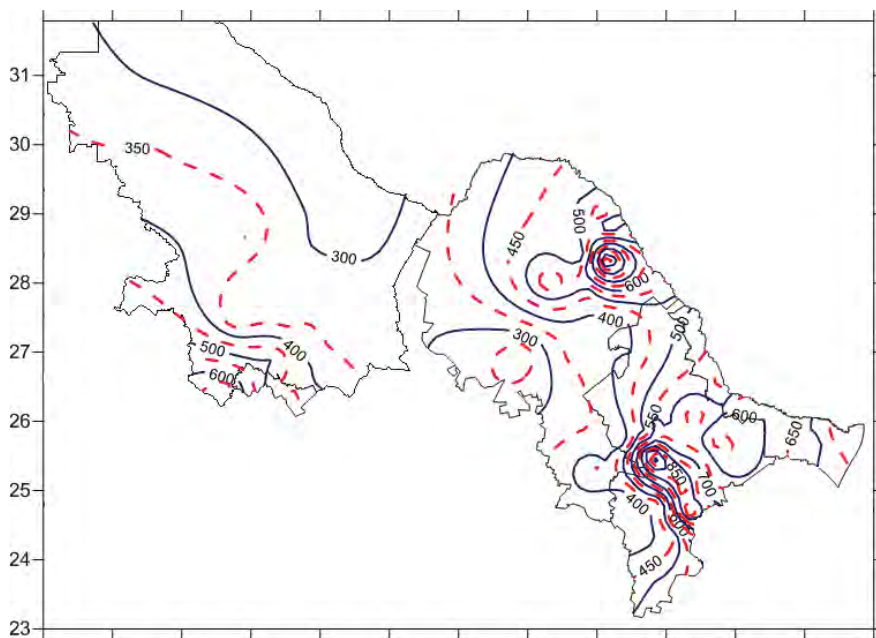


Figura47 Isoyetas medias históricas para la RHA VI.
Fuente: CONAGUA, 2013.

La precipitación en la región es muy variable, lo anterior derivado de las condiciones de topografía, ubicación geográfica y condiciones de humedad climática regional. Sin embargo se observa que en la región se tienen precipitaciones por debajo de los 500 mm anuales en la

mayoría del territorio, lo cual nos habla de una zona de bajas precipitaciones, incrementando las precipitaciones en la zona próxima costera y en la cuenca del río San Juan (ver Figura47). En la parte serrana al poniente se observa también un incremento de las condiciones húmedas. La lluvia media en la región hidrológica administrativa es de 507 mm anuales (ver Figura48). Para la región hidrológica 34 la precipitación media es 318 mm anuales mientras que para la región hidrológica 24 es de 501 mm anuales, valores por debajo de la media nacional que es de 760 mm.

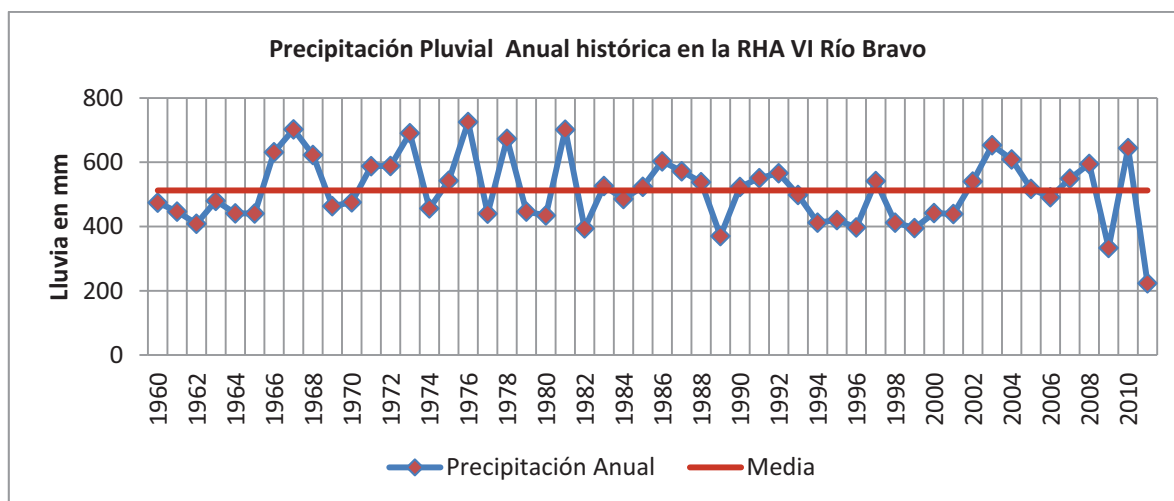


Figura48 Precipitación pluvial anual histórica y media en la RHA VI.
Fuente: CONAGUA, 2013.

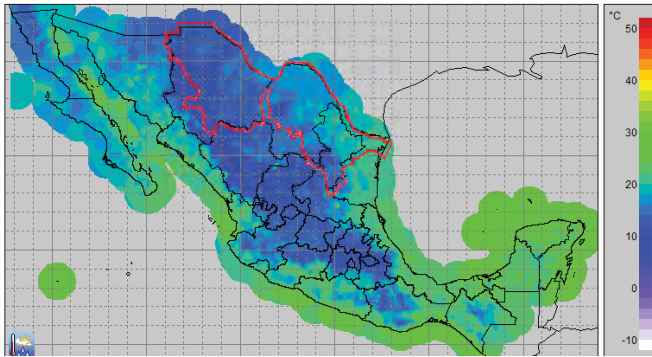


Figura49 Temperatura observada media anual en la RHA VI.

Fuente: (IMTA, 2010)

Temperatura.

De acuerdo al extractor rápido de información meteorológica ERIC III V.2 la temperatura media en la región oscila alrededor de los 20° C con temperaturas máximas promedio de hasta 36° C presentándose principalmente en el mes de Julio (ver Figura49).

Como se aprecia en las *Figura49* y *Figura50* la temperatura no es un factor principal para el origen de la sequía, pues la temperatura promedio anual se encuentra por debajo de la registrada en los litorales mexicanos y la temperatura máxima promedio anual es muy similar en todo el país siendo los casos más extremos en los límites de los estados de Guerrero y Michoacán.

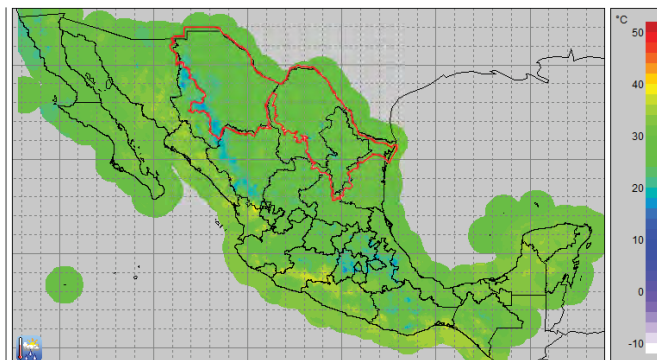


Figura50 Temperatura máxima media anual en la RHA VI.

Fuente: (IMTA, 2010)

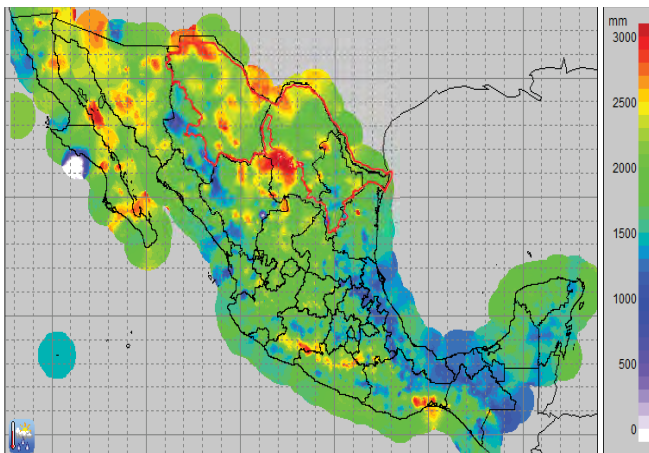


Figura51 Evaporación acumulada media anual en la RHA VI.

Fuente: (IMTA, 2010)

En cuanto a la evaporación la región presenta altas tasas de evaporación como se aprecia en la *Figura51*. Se observa que en su mayoría las tasas más altas se encuentran en la zona de los límites de Coahuila, Chihuahua y Durango. De igual forma se aprecia que los estados de Chihuahua y Coahuila presentan tasas de evaporación media acumulada anual de hasta 3000 mm y en la región la tasa media de evaporación oscila alrededor de los 1700 mm anuales.

4.2 DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA CUENCA.

En el documento “Estadísticas del Agua en México”, (CONAGUA, 2011), se menciona que la RHA VI cuenta con un escurrimiento medio anual de 6,857 hm³ y una recarga media de acuíferos anual de 5,306 hm³.

Las precipitaciones son mayores en los meses de Julio a Septiembre oscilando entre los 75 y 81 mm mientras que los meses más secos son febrero y Marzo con 12 y 10 mm respectivamente de precipitación acumulada.

De acuerdo a los datos publicados en dicho documento, se realizó un balance general hídrico de la región, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 9 Balance general hídrico de los procesos hidrológicos en la RHA VI Río Bravo.

REGIÓN	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL	ÁREA DE CUENCA	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL	ESCURRIMIENTO MEDIO	RECARGA ANUAL	EVAPOTRANSPIRACIÓN
	mm	km ²	km ³	hm ³	hm ³ /año	hm ³ /año	hm ³ /año
RIO	438	378179.77	165.64	165642.74	6857	5306	153479.74
				100%	4.14%	3.20%	92.66%

Fuente: Elaboración propia con información (CONAGUA, 2011).

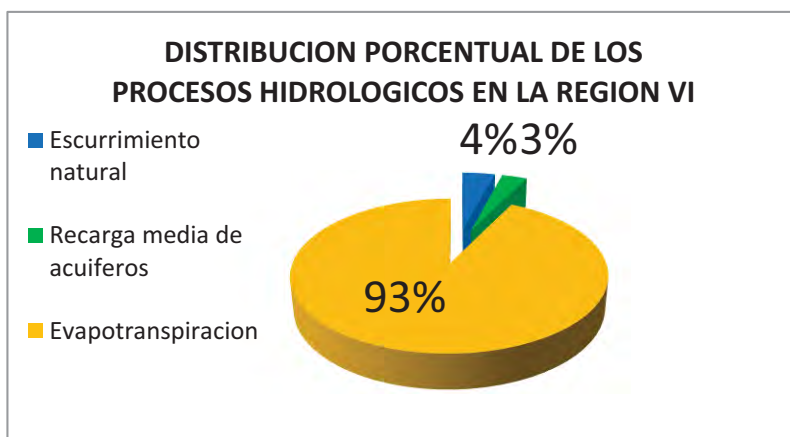


Figura52 Distribución porcentual del agua en la RHA VI.

Fuente: Elaboración propia.

En la *Tabla 9* se observa la estimación de la evapotranspiración realizada y en la *Figura52* los resultados gráficos. Se muestra que del agua que se precipita en la región hidrológica el 93% se evapora, el 4% escurre a los cauces y el 3% recarga a los acuíferos.

Puede parecer demasiado el valor de la evapotranspiración pero de acuerdo a un estudio realizado por la Universidad Nacional Autónoma de México a través del Instituto de Geografía en el documento “Análisis de la evaporación media en la cuenca del río Conchos, afluente del río Bravo” estimaron la evapotranspiración en la cuenca del río Conchos, a través de la metodología TURC, en la cual hacen intervenir variables de clima, precipitación y altitud.

En este estudio obtuvieron las isóneas de evapotranspiración media anual, los datos de precipitación utilizados y la evapotranspiración anual acumulada obtenida por la

metodología TURC y de esta manera se obtuvo la media aritmética de los datos de lluvia utilizados hasta la fecha del estudio y se verificó que la precipitación media aritmética es de 380 mm para las estaciones pluviométricas utilizadas, mientras que la evapotranspiración acumulada anual resultó de 341 mm, lo que indica que un 90% del agua que se precipita en la cuenca del río Conchos se evapotranspira.

El área de la cuenca del río Conchos representa aproximadamente un 18% del total del área de la RHA VI, dada esta representatividad se corroboran los porcentajes de evapotranspiración obtenidos para la RHA.

4.3 EFECTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA REGIÓN.

La RHA VI abarca un total de 144 municipios, distribuidos en los 4 estados ya mencionados. En la región viven 11,295,363 personas de acuerdo al Censo de población y vivienda del INEGI 2010. De acuerdo a este censo existen un total de 3,223,991 viviendas habitadas.

En el sexto informe de gobierno del año 2012 se dice que la participación al PIB nacional de los estados que conforman la región fue del 16% al 2011, y de acuerdo al documento estadísticas del agua en México PIB para la RHA VI al 2009 fue del 14.29% el cual ubica a la RHA en tercer lugar de aportación a nivel nacional.

Siendo conscientes de esta información la importancia de la región es muy grande por la cantidad de personas que viven en ella, así como por su aportación a la riqueza nacional y por su contribución a la biodiversidad Nacional.

El cambio climático es el fenómeno ambiental que mayor relevancia ha alcanzado en los últimos años a causa de sus posibles consecuencias, muchas de ellas irreversibles. Se considera que la población de escasos recursos de los países en vías de desarrollo será la que sufrirá los efectos más negativos debido a su mayor vulnerabilidad.

En este contexto, evaluar la vulnerabilidad de los grupos sociales frente al cambio climático cobra especial relevancia, al identificar e implementar medidas orientadas a promover procesos de adaptación y mitigación, reduciendo así las consecuencias negativas del cambio climático en los procesos de desarrollo.

Son diversos los aspectos en los que el Cambio Climático afecta a la RHA, a continuación se presenta en la *Tabla 10* las posibles implicaciones que conllevaría y posteriormente una descripción de cada una de ellas.

Tabla 10 Tipos de vulnerabilidad al cambio climático en RHA VI.

Vulnerabilidad cualitativa de las Regiones Hidrológico – Administrativas de México.							
Región Hidrológico Administrativa	Cambios en la demanda	Cambios en la disponibilidad	Escases	Huracanes y tormentas	Sequías	Cambios en el nivel del mar	Observaciones
VI Río Bravo	Altos, por efectos demográficos y aumento de la temperatura.	Se prevén importantes reducciones en el escurrimiento y recarga de acuíferos.	Muy vulnerable.	Poco vulnerable.	Muy vulnerable.	No es vulnerable.	Es una de las cuencas más importantes de México y más vulnerable a sequías y escases.

Fuente: (Martínez & Patiño, 2010).

Los cambios en la demanda serían un factor en el que la RHA es muy vulnerable pues con sus condiciones naturales hacen que por su clima predominantemente seco, su temperatura media anual de 20° C y periodos prolongados de escases de lluvia la población requiera de mayor cantidad de agua para cubrir sus necesidades, adicionalmente de la implicación que tendría el fenómeno de migración de las zonas de escases a donde existe disponibilidad lo cual alteraría el equilibrio existente entre oferta y demanda.

Los cambios en la disponibilidad sería una consecuencia de la falta de precipitación que se espera en la región y de los incrementos de temperatura. Adicionalmente las sequías son un fenómeno que actualmente azotan la región y con el cambio climático se espera se incrementen sus efectos provocando escases del recurso hídrico y cambios en la capacidad de oferta.

En cuanto a la escases actualmente ya se reportan problemas de fuentes de abastecimiento para diversos usos, y con los sistemas actuales de abastecimiento para agricultura y uso público que no cuentan con un manejo integral y sustentable el problema se incrementaría. Asimismo los movimientos de masas en busca del recurso hídrico harían del problema un fenómeno movible y expansivo y frenaría la capacidad de producción de la región.

Las tormentas y huracanes no son de gran impacto para la región únicamente para la zona ubicada en las costas del estado de Tamaulipas. Por otra parte los huracanes y tormentas son de gran importancia para la región por la cantidad de lluvia que dejan durante su paso.

El fenómeno de la sequía es de gran impacto para la región, como ya se comprobó en la sequía del año 2010 en la que se generaron grandes pérdidas económicas e incluso pérdidas humanas por la gravedad del fenómeno. Adicionalmente genera desempleo, enfermedades y movimientos migratorios. La ubicación geográfica de la región la hacen propensa a las sequías y aunado a que se esperan incrementos de la temperatura en estas zonas la gravedad del asunto se incrementaría de manera inesperada.

Finalmente los cambios en los niveles del mar no provocarían gran impacto en la región hidrológica, únicamente en las zonas costeras donde pueden incrementarse problemas de inundación y la salinización de acuíferos, por lo que se tendría que realizar un programa de manejo de acuíferos para evitar intrusión marina.

En conclusión la forma en que es más vulnerable la región al cambio climático es por el incremento de la temperatura y reducción de la precipitación lo cual generaría problemáticas de escases e incremento del fenómeno meteorológico de sequía.

4.4 CALIDAD DEL AGUA.

La evaluación de la calidad del agua se llevó a cabo utilizando tres indicadores: la Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO5), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST). La DBO5 y la DQO se utilizan para determinar la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua provenientes principalmente de las descargas de aguas residuales tanto de origen municipal como no municipal. (CONAGUA, 2011).

La DBO5 determina la cantidad de materia orgánica biodegradable y la DQO mide la cantidad total de materia orgánica. El incremento de la concentración de estos parámetros incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua con la consecuente afectación a los ecosistemas acuáticos.

Por otro lado, el aumento de la DQO indica presencia de sustancias provenientes de descargas no municipales.

Los SST tienen su origen en las aguas residuales y la erosión del suelo. El incremento de los niveles de SST hace que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática.

De acuerdo a las mediciones registradas por la CONAGUA presentadas en el documento Estadísticas del Agua en México edición 2011, la conformación de los sitios de medición en la región se comportó como se muestra en la *Tabla 11*.

Tabla 11 Distribución porcentual de los sitios monitoreados mediante diversos parámetros en la RHA VI.

INDICADOR	EXCELENTE	BUENA CALIDAD	ACEPTABLE	CONTAMINADA	FUERTEMENTE CONTAMINADA
DBO5	48.6	46.2	2.6	2.6	0
DQO	51.6	39.8	1.1	7.5	0
SST	82.8	12.9	4.3	0	0

Fuente: Elaboración propia con información de (CONAGUA, 2011).

Las distribución de los resultados de los sitios de muestreo se presenta en la *Figura53* para el caso de la DBO₅ y en la *Figura54* para el caso de la DQO.

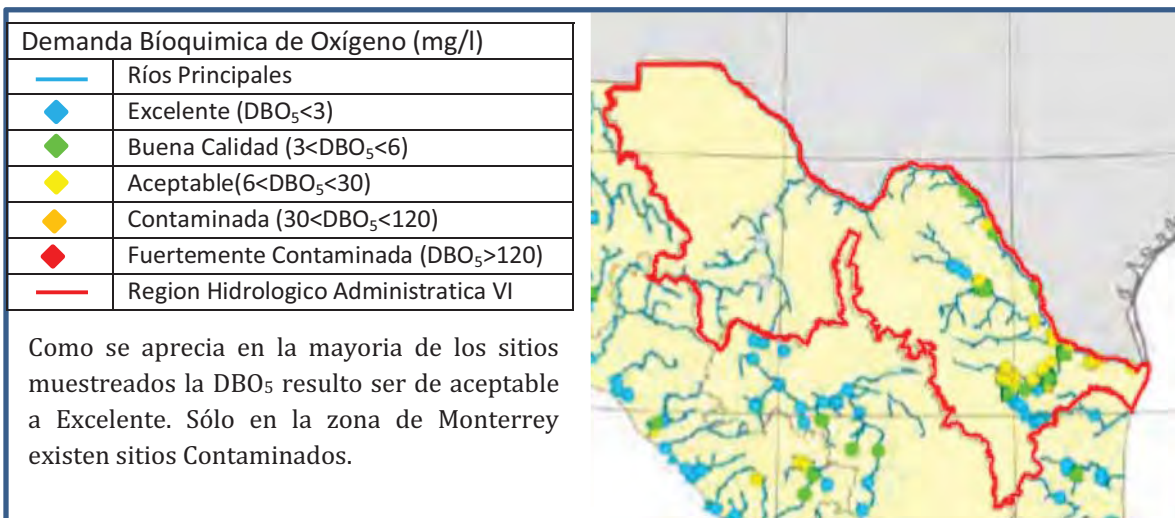


Figura53 Calidad del agua según DBO₅ en la RHA VI.

Fuente: (CONAGUA, 2011)

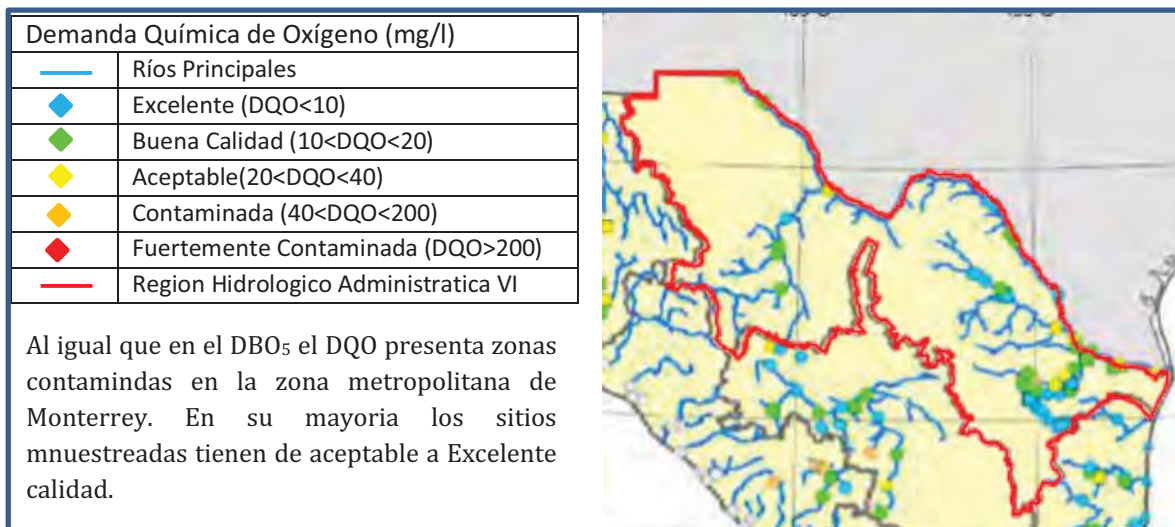


Figura54 Calidad del agua según DQO en la RHA VI.

Fuente: (CONAGUA, 2011)

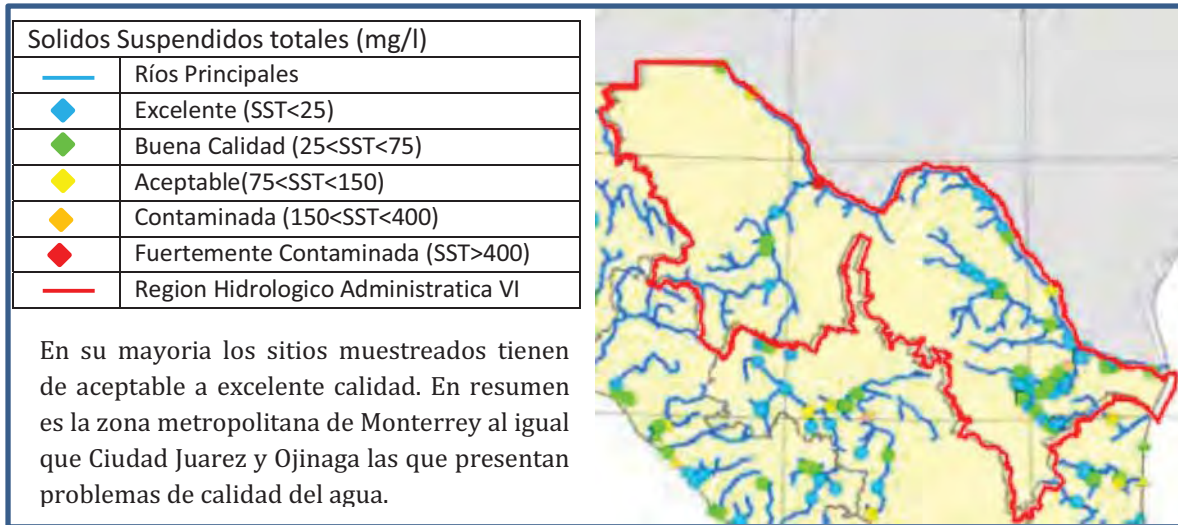


Figura55 Calidad del agua según SST en la RHA VI.
Fuente: (CONAGUA, 2011)

Como se observa en la *Figura55* los sitios con mayor contaminación según la prueba SST son en donde se concentran poblaciones urbanas siendo el caso de Ciudad Juárez, Ojinaga, Piedras Negras, Ciudad Acuña y la zona metropolitana del Monterrey.

En el caso de las aguas subterráneas no se tiene una red formal de monitoreo que arroje datos de la calidad del agua en la región. Se cuenta con algunos estudios que mencionan que se tienen problemas de agua sulfatada-cálcica y bicarbonatada-cálcica en el acuífero Meoqui – Delicias. (CONAGUA, 2009). Asimismo existen algunos informes de estudio elaborados por CONAGUA y algunas otras instituciones donde se muestra que a lo largo de la región las aguas subterráneas en algunos puntos presentan problemas de contaminación por sales y sólidos disueltos. Por otra parte la presencia de metales pesados como fierro y manganeso hacen que el uso del agua subterránea no sea el idóneo para su consumo.

La región hidrológica cuenta con un comité que participa en el programa de playas limpias promovido por la CONAGUA en la que de acuerdo a mediciones del año 2010 la playa conocida como Playa Bagdad, en el estado de Tamaulipas se encuentran en estado conveniente para actividades recreativas (ver *Tabla 12*).

Tabla 12 Calidad del agua marina en playas de la RHA VI.

Localidad	Aforo anual de turistas	Sitio de muestreo	Resultados NMP enterococos/100 ml de agua marina.				
			Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Playa Bagdad	300 mil personas	Bagdad Norte	10	<10	<10	86	<10
		Frente a Av. Lauro Villar	<10	<10	60	29	<10
		Bagdad Sur	<10	24	32	20	<10

Fuente: (CONAGUA, 2011)

4.5 USOS DEL AGUA

El agua es empleada de diversas formas prácticamente en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o para producir e intercambiar bienes y servicios.

4.5.1 USO CONSUNTIVO

En el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), se registran los volúmenes concesionados o asignados de volúmenes destinados al uso público urbano o doméstico a los usuarios de aguas nacionales. En dicho registro se tienen clasificados los usos del agua en 12 rubros, mismos que para fines prácticos se han agrupado en cinco grandes grupos; cuatro de ellos corresponden a usos consuntivos, a saber, el agrícola, el abastecimiento público, la industria autoabastecida y la generación de energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad, y por último el hidroeléctrico, que se contabiliza aparte por corresponder a un uso no consuntivo. En este capítulo se empleará el término uso agrupado, para distinguir a esos cinco grandes grupos.

ESCURRIMIENTO NATURAL MEDIO SUPERFICIAL	6,857 HM ³
RECARGA MEDIA ANUAL DE ACUÍFEROS	5,306 HM ³
AGUA DISPONIBLE TOTAL	12,163 HM ³
GRADO DE PRESIÓN DEL RECURSO	76 % ALTO

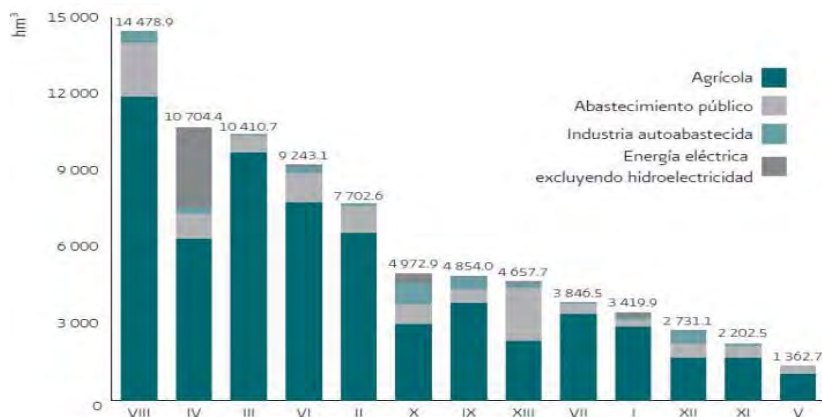


Figura56 Usos consuntivos del agua en México.

Fuente: CONAGUA, 2010.

Como se aprecia en la *Figura56* para la región hidrológica del río Bravo los usos consuntivos tienen un valor de 9,243.1 hm³ al año. (CONAGUA, 2011). De los cuales alrededor de 7,700 hm³ son para uso agrícola es decir un 83 % de los usos consuntivos. Siguiendo el abastecimiento público

con alrededor de 1,150 hm³ correspondiendo a un 12.5%, el tercer rubro es la Industria autoabastecida con aproximadamente un 3.5% y la generación de energía no hidroeléctrica un 1%.

La región hidrológica VI río Bravo presenta un grado de presión alto sobre el recurso hídrico teniendo un valor de 76 %. Esto deberá ser tomado como un índice que ayude a buscar nuevas tecnologías que eficiente el uso del agua principalmente en el sector agrícola pues es el sector con mayor demanda en la región como se aprecia en la *Figura57*.

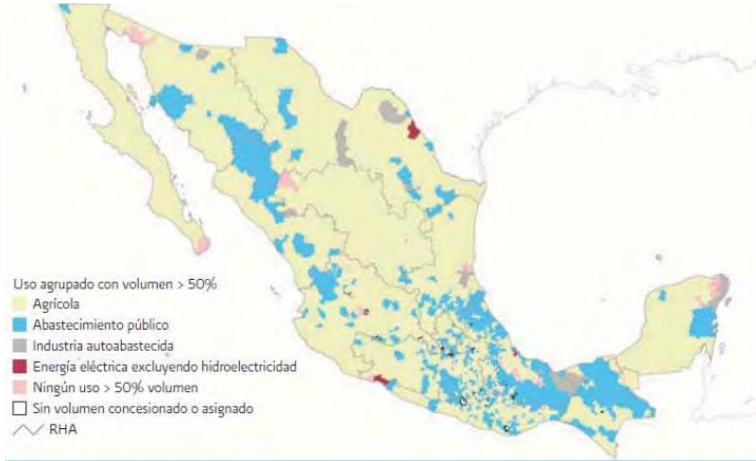


Figura57 Distribución de los usos consuntivos del agua en México.
Fuente: (CONAGUA, 2011)

De los usos consuntivos a continuación se presenta en la *Tabla 13*, donde de acuerdo al 6to informe de gobierno del año 2012 se observan los porcentajes por actividad económica del PIB que se produce en la RHA Río Bravo. En esta tabla se observa que el sector agropecuario produce el 3% del PIB de la región cuando está haciendo uso del 83% del agua concesionada, mientras que la construcción, comercio y el sector servicios ingresan el 42 % haciendo uso de un 12.5% correspondiente al sector de abastecimiento. Finalmente la industria produce el 25% del PIB haciendo uso del 3.5% del agua consuntiva de la región.



Figura58 Fuentes predominante de abastecimiento de agua en México.
Fuente: (CONAGUA, 2011)

Tabla 13 Principales aportaciones al PIB 2010 por sector de los estados que integran la RHA VI.

ESTADO	PIB TOTAL	Agropecuario, pesca, caza y forestal	Construcción	Industrias	Comercio	Trasportes, Correos y almacenamiento	Servicios inmobiliarios	PIB Per cápita
TOTAL	\$ 1,468,963	\$ 42,028	\$ 124,645	\$ 361,792	\$ 223,221	\$ 118,686	\$ 154,532	\$ 100,058
COAHUILA	\$ 269,474	\$ 7,704	\$ 16,624	\$ 94,578	\$ 34,444	\$ 23,000	\$ 22,406	\$ 98,028
CHIHUAHUA	\$ 264,246	\$ 17,610	\$ 16,332	\$ 64,384	\$ 40,942	\$ 13,035	\$ 33,771	\$ 75,846
NUEVO LEÓN	\$ 661,077	\$ 5,970	\$ 63,047	\$ 161,505	\$ 106,028	\$ 55,140	\$ 64,094	\$ 142,904
TAMAULIPAS	\$ 274,166	\$ 10,744	\$ 28,642	\$ 41,325	\$ 41,807	\$ 27,511	\$ 34,261	\$ 83,453

ESTADO	PIB TOTAL	Agropecuaria, pesca, caza y forestal	Construcción	Industrias	Comercio	Trasportes, Correos y almacenamiento	Servicios inmobiliarios	PIB Per capita
PORCENTAJE DE PARTICIPACIÓN CON RESPECTO AL TOTAL		3%	8%	25%	15%	8%	11%	

Fuente: (Presidencia, 2012)

Uso agrícola.

De acuerdo al documento “Estadísticas agrícolas de los distritos de riego Año agrícola 2009 – 2010”, (CONAGUA, 2011), en la RHA Rio Bravo se siembran 377 707 ha de las cuales se cosechan 359 404 ha, originando una producción de 3 084.42 miles de Ton con un valor aproximado de 6 343.32 millones de pesos.

En dicho documento se menciona que en la región existen 12 Distritos de riego mismos que se presentan en la *Tabla 14*.

Tabla 14 Distritos de riego en la región hidrológico administrativa VI.

DISTRITO	NOMBRE	ESTADO	RHA	RH
4	Don Martín	Nuevo león	VI Río Bravo	24
5	Delicias	Chihuahua	VI Río Bravo	24
6	Palestina	Coahuila	VI Río Bravo	24
9	Valle de Juárez	Chihuahua	VI Río Bravo	34
25	Bajo río bravo	Tamaulipas	VI Río Bravo	24
26	Bajo río san juan	Tamaulipas	VI Río Bravo	24
31	Las lajas	Nuevo león	VI Río Bravo	24
42	Buenaventura	Chihuahua	VI Río Bravo	34
50	Acuña - falcón	Tamaulipas	VI Río Bravo	24
89	El Carmen	Chihuahua	VI Río Bravo	34
90	Bajo río conchos	Chihuahua	VI Río Bravo	24
103	Río florido	Chihuahua	VI Río Bravo	24

Fuente: (Presidencia, 2012)

Con base en el sexto informe de gobierno los estados que constituyen la región hidrológica tienen un total de 219 unidades de riego al año 2012 (ver *Tabla 15*).

Tabla 15 Unidades de riego en la región hidrológico administrativa VI.

Entidad	Unidades de Riego			
	Número		Superficie Total (has)	
	2011	2012 /P	2011	2012 /P
Chihuahua	49	59	1485	3089
Coahuila	44	53	2833	1767
Nuevo León	26	31	1591	1502
Tamaulipas	12	14	731	2652

Fuente: (Presidencia, 2012).

De la superficie sembrada el 83% cuenta con sistemas de riego y el 17% de la superficie es de temporal. (CONAGUA, 2011). Asimismo en la región se siembran los siguientes cultivos presentados en la *Figura59*.

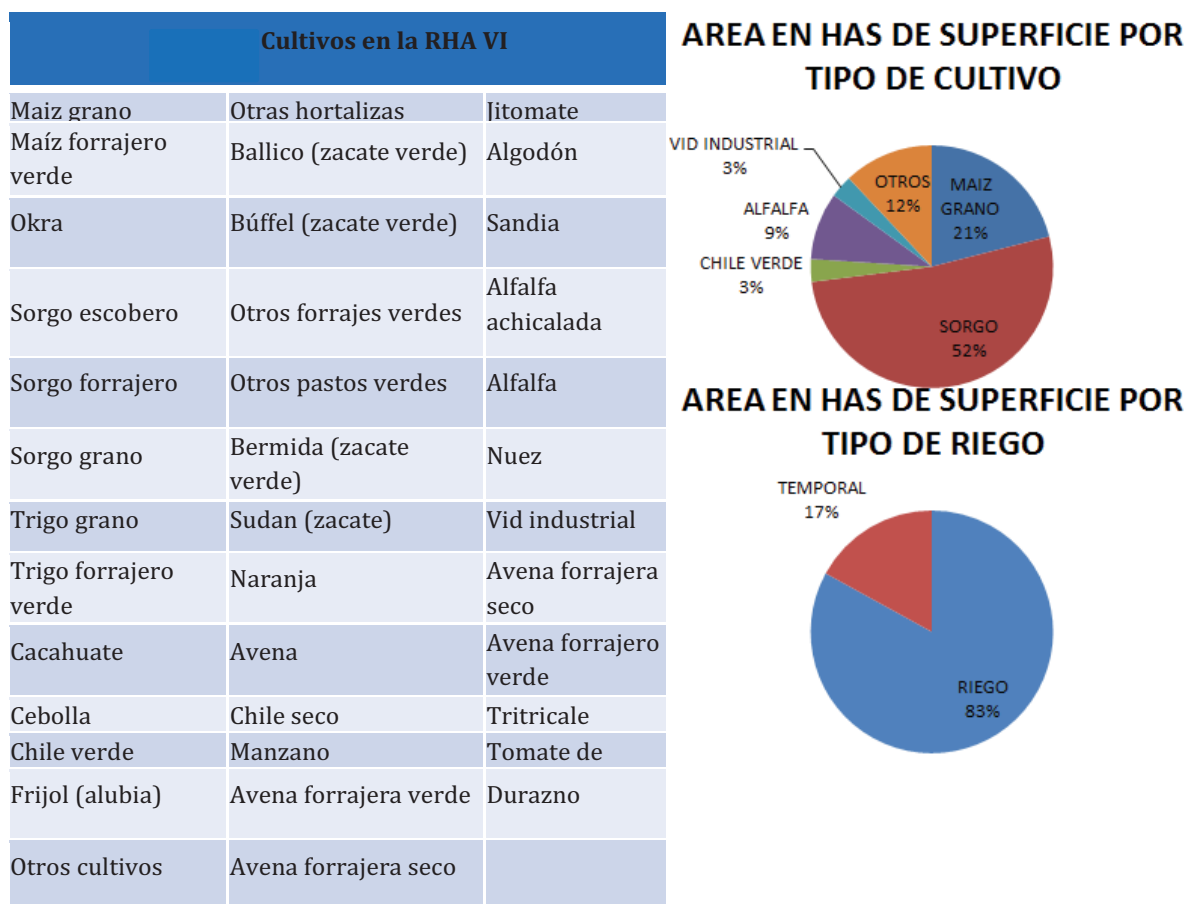


Figura59 Tipos de cultivos y de riego en la RHA VI.
Fuente: (CONAGUA, 2011)

Abastecimiento público.

En los resultados definitivos del XIII Censo de Población y Vivienda, (INEGI, 2010), con cifras al 12 de junio del mismo año, de los 111.3 millones de personas que habitan en viviendas particulares en México, 100.5 millones cuentan con el servicio de agua potable y 99.1 millones con el de alcantarillado, es decir, 10.8 millones de personas no cuentan con servicio de agua entubada y 12.2 carecen del servicio de alcantarillado, cifras que representan el 9.70% y 10.96% de la población, respectivamente.

De acuerdo al documento estadísticas del agua en México la RHA 6 ha venido incrementando su cobertura tanto de agua potable como de drenaje, pues de acuerdo a la *Figura60* la cobertura al 2005 de agua potable era de 96% mientras que la de

drenaje es del 93.5%. En la Tabla 16 y *Tabla 17* se observa a detalle el estado de la cobertura de drenaje y de agua potable en los estados de la RHA VI.

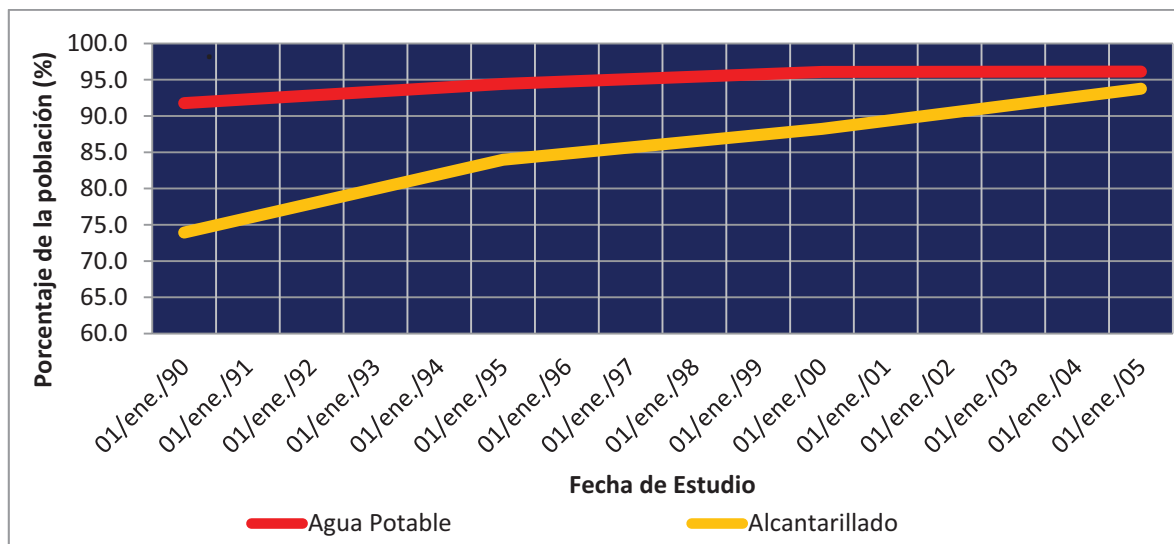


Figura 60 Cobertura de agua potable y alcantarillado en la población en la región hidrológica VI Río Bravo

Fuente: (CONAGUA, 2011)

Tabla 16 Porcentaje y tipo de cobertura de agua potable Región Hidrológico Administrativa VI.

Estados	Con agua dentro de la vivienda.	Con agua dentro del terreno.	Con agua de llave pública o hidrante.	Con agua de otra vivienda.	Sin servicio de agua potable.
TOTAL	87%	8%	1%	1%	3%
Coahuila	87%	9%	2%	1%	1%
Chihuahua	88%	6%	1%	0%	5%
Nuevo León	93%	3%	1%	0%	3%
Tamaulipas	80%	14%	1%	1%	4%

Fuente: (CONAGUA, 2011)

Tabla 17 Porcentaje y tipo de cobertura de drenaje en la Región Hidrológico Administrativa VI.

Estados	Con drenaje conectado a la red pública.	Con drenaje a fosa séptica.	Con drenaje a barranca o grieta.	Con drenaje a río, lago y/o mar.	Sin servicio de alcantarillado.
TOTAL	83%	8%	1%	0%	9%
Coahuila	82%	13%	1%	0%	5%
Chihuahua	82%	9%	1%	0%	8%
Nuevo León	90%	5%	1%	0%	4%
Tamaulipas	77%	4%	1%	0%	18%

Fuente: (CONAGUA, 2011)

Como se aprecia en la región se cuenta con una buena cobertura de agua potable y de drenaje, siendo Chihuahua el estado con menor porcentaje de cobertura de agua potable y Tamaulipas el estado con menor cobertura de drenaje.

En la *Figura61* y *Figura62* se observa el estado de las plantas para potabilización de agua en la región, siendo una de las regiones mejor instrumentada para potablizar agua.

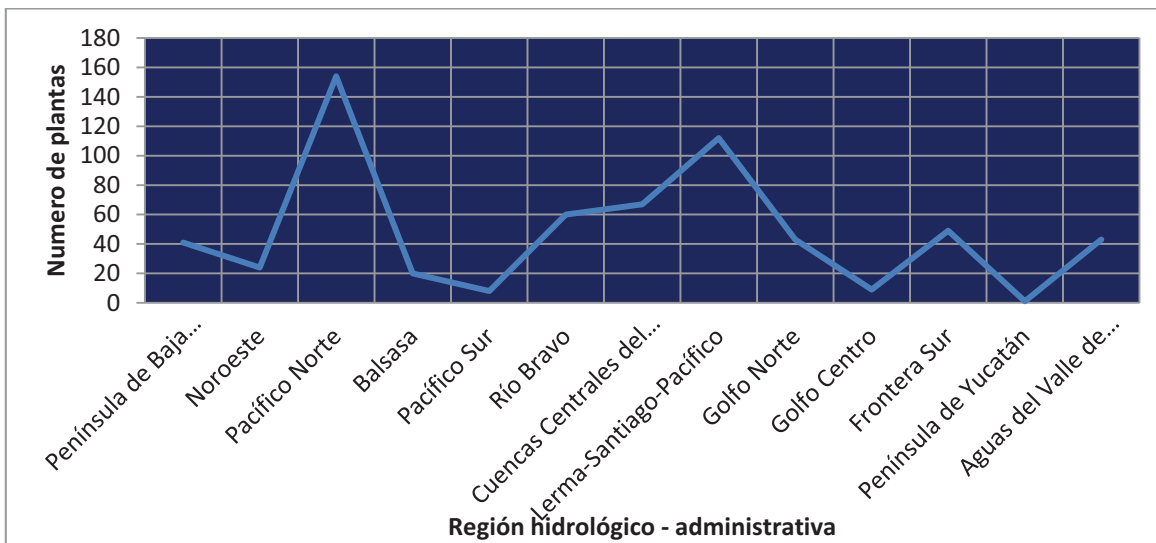


Figura61 Número de plantas potabilizadoras en operación por RHA.
Fuente: (CONAGUA, 2011)

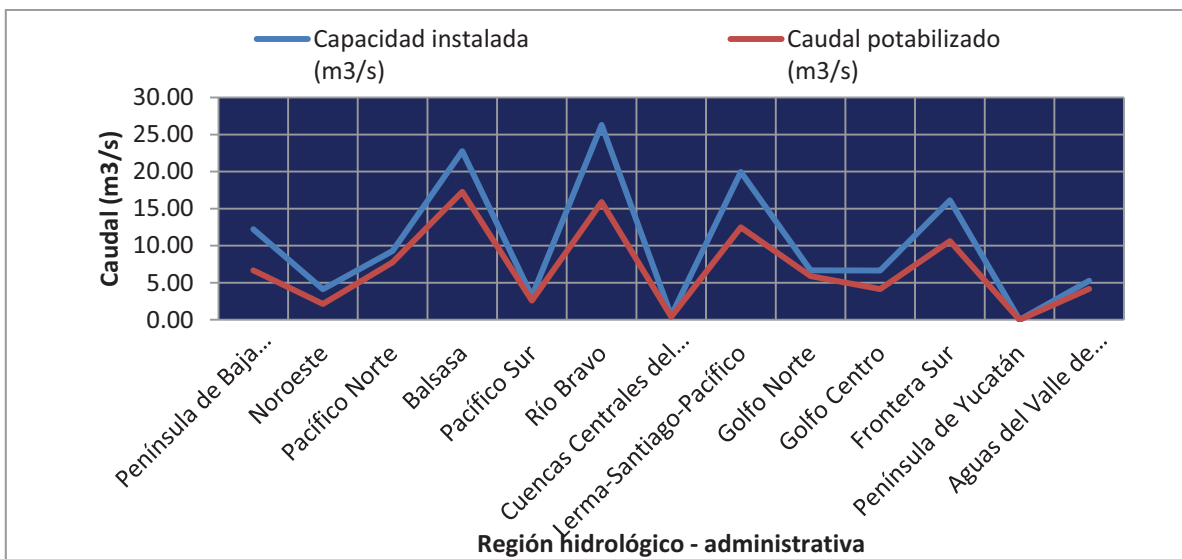


Figura62 Capacidad instalada y caudales potabilizados (m³/s) por RHA.
Fuente: (CONAGUA, 2011)

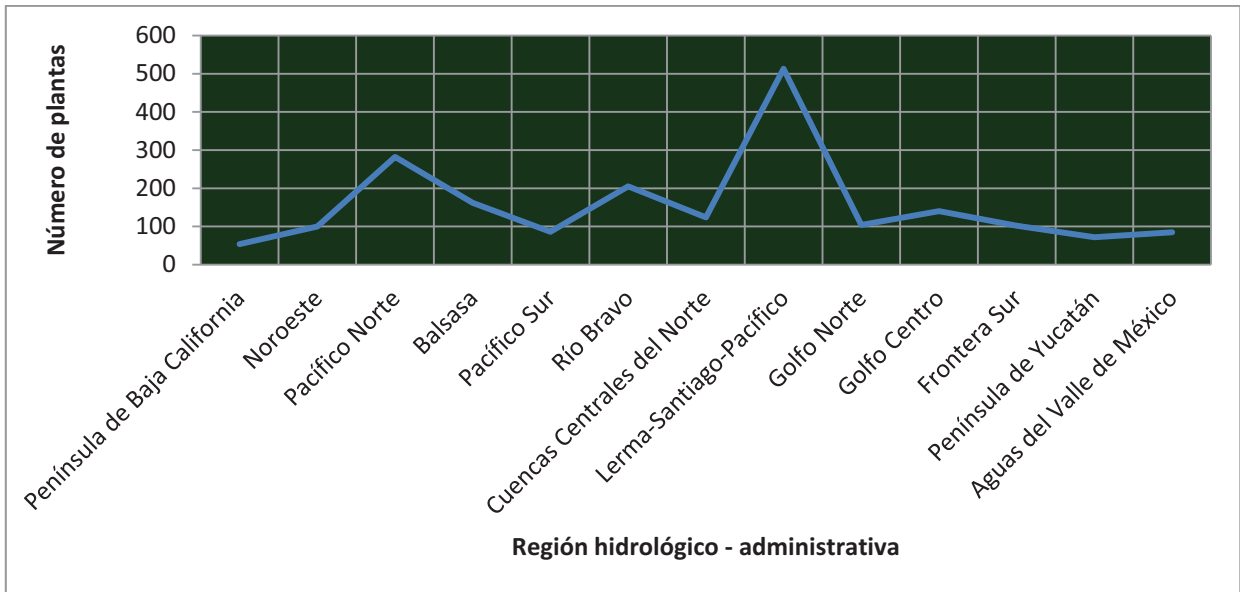


Figura63 Número de plantas de tratamiento de aguas residuales por RHA.
Fuente: (CONAGUA, 2011)

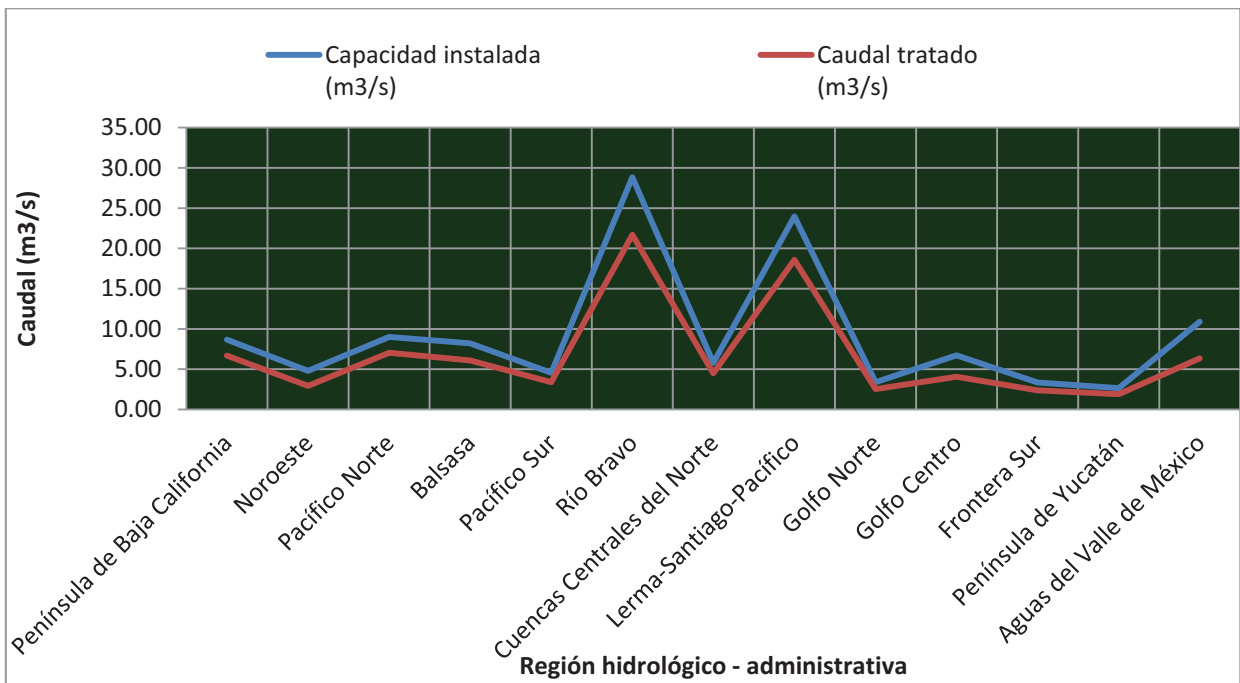


Figura64 Capacidad instalada y caudales saneados (m3/s) por RHA.
Fuente: (CONAGUA, 2011)

Con respecto al tratamiento de agua residual se observa en *Figura63* y *Figura64* que la RHA Río Bravo es la que mejor instrumentada está en el tratamiento de agua y saneamiento.

4.5.2 USO NO CONSUNTIVO

Como se aprecia en la *Figura65* los usos no consuntivos para la región hidrológica VI Río Bravo han venido en aumento a partir del año 2004, presentando una disminución en años anteriores hasta el 2009.

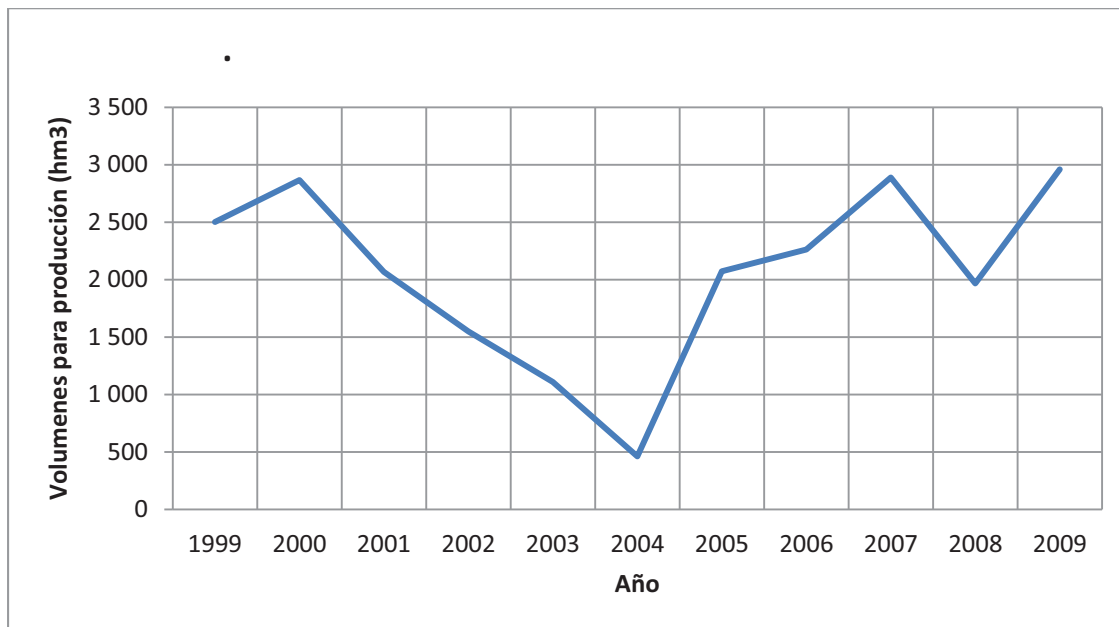


Figura65 Volúmenes de agua para producción de energía hidroeléctrica para RHA VI.
Fuente: (CONAGUA, 2011)

Dentro de la región existen cuatro principales presas generadoras de energía siendo estas la presa internacional La Amistad, la presa internacional Falcón, la presa La Boquilla y La Colina sobre el río Conchos. De acuerdo a datos de la Comisión Federal de Electricidad del 100% de la capacidad instalada para generación en la región, el 1% corresponde a energía hidroeléctrica siendo las más ampliamente usadas las carboeléctricas, de producción independiente y las de ciclo combinado (ver *Figura66*).

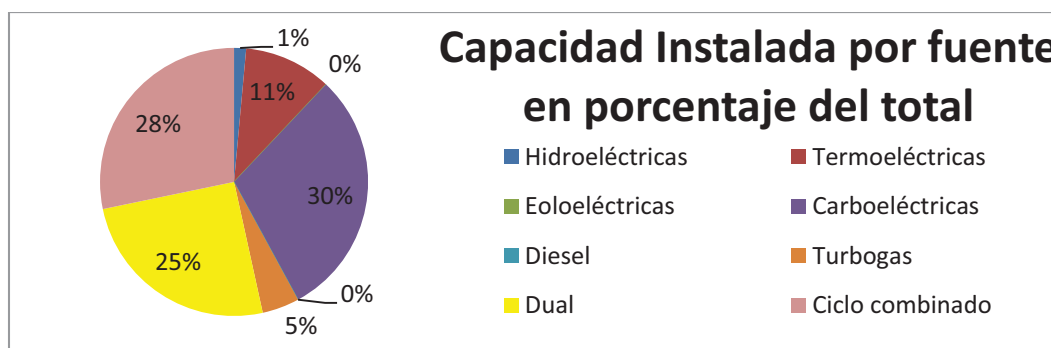


Figura66 Capacidad instalada para producción de energía eléctrica por tipo de fuente para la RHA VI.
Fuente: (CFE, 2012)

4.6 MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES.

De acuerdo al documento “El Ambiente en Números” publicado por la SEMARNAT en el año 2011 a continuación se presentan una serie de datos relacionados con la situación ambiental de la RHA VI.

Los estados que conforman la región son 4 estados, siendo Coahuila, Chihuahua, Nuevo León y Tamaulipas. La información que se muestra a continuación estará referida a los estados mencionados.

Población

La población en los estados mencionados del año 1980 al 2005 se incrementó en un 62%, principalmente en los estados de Nuevo León, Chihuahua y Tamaulipas, siendo un total de 11, 295, 363 personas según el censo de población y vivienda al año 2010 dentro de la Región Hidrológica.

En la cuenca aproximadamente el 87% está conformada por población urbana, siendo Chihuahua el estado con menor población urbana con sólo el 79% y el más alto el de Nuevo León con un 93%. En los estados mencionados el índice de matriculación es de 62%, el de alfabetización es en promedio de 96%, el índice de escolaridad es del 85 %, el índice PIB per cápita es mayor en Nuevo León con un índice de 81% siendo el promedio de 77%, el índice de desarrollo humano se encuentra en un 83% y el grado de desarrollo humano es alto.

Vegetación

En cuanto a la producción y aprovechamiento autorizado forestal maderable para el año 2008 se tenía un aprovechamiento autorizado de 611 Mm³ y una producción de 1,439 Mm³ siendo los estados de Chihuahua, Coahuila y Tamaulipas los más sobreexplotados.

En cuanto al recurso forestal no maderable se tiene una disponibilidad de 11,788 toneladas y una producción de 27,106 toneladas. Todos los estados presentan sobreexplotación siendo los casos más críticos los de Coahuila y Tamaulipas.

En los estados de la región hidrológica se presentaron 1,090 incendios forestales, siendo el estado con mayor incidencia el estado de Chihuahua con 842 casos en el año 2009. En este año se afectaron 37,540 ha siendo el estado de Coahuila el más afectado con 21,476 ha. Asimismo se autorizaron en este año un total de 150 solicitudes para cambio de uso de suelo en terrenos forestales, correspondiendo a un total de 3,343 ha. Dichas solicitudes fueron por 143 ha de bosque y 3,200 ha de desierto.

Los usos que se dieron a los terrenos con cambio de uso del suelo fue para la industria básica con 2,882 ha y 460 ha para otros usos. No se registraron cambios de uso del suelo para Agricultura ni ganadería. Lo anterior es un foco de alarma pues la industria de la zona está creciendo en zonas desérticas.

En los estados se reforestaron en el año 2009, 43,018 ha siendo el año en que más se reforesto el 2007 con 129 mil ha. El estado que más reforesto fue el estado de Durango y Nuevo León.

Suelos

La degradación física del suelo está presente en 2,033,925 ha y la química en 8,116,469 ha, siendo más grave la degradación química. La mayor degradación del suelo es de origen eólica con 11,281,652 ha mientras que la degradación hídrica es de 4,841,849 ha. El estado con mayor problemática es Chihuahua con 9,954, 352 ha con degradación en su mayoría eólica.

Biodiversidad

Dentro de la biodiversidad la riqueza de especies que se presenta en los estados es de Pteridofitas con 482 especies, Gimnoespermas 106 especies, Angioespermas 4,507 especies, Peces 276 especies, Anfibios 132 especies, Reptiles 464 especies, Aves 1,258 especies y Mamíferos 517 especies.

En cuanto a la superficie para el manejo de la vida silvestre en el año 2001 se ha presentado la máxima extensión con 590,227 ha, disminuyendo año con año hasta el año 2009 con 247,734 ha. Siendo el estado de Coahuila el estado con mayor extensión.

En cuanto a la caza deportiva en los años 2006 a 2008 se registraron un total de 13,013 licencias para caza deportiva. Siendo Nuevo León y Coahuila los que más licencias expiden.

Atmósfera

Dentro de las ciudades con mayor concentración de gases contaminantes se encuentran Ciudad Juárez y Zona Metropolitana de Monterrey, presentando altas concentraciones de Dióxido de Nitrógeno, Monóxido de carbono, Ozono, Partículas suspendidas con diámetros menores a 10 micrómetros y Dióxido de azufre. En ambas ciudades el principal contaminante es las partículas suspendidas con diámetros menores a 10 micrómetros con 53 y 85 mil toneladas respectivamente al año 2009.

Dentro de los principales emisores de gases de efecto invernadero están el consumo y emisiones fugitivas de combustibles, emitiendo CO₂, CH₄ y N₂O. La siguiente actividad que genera CO₂ es la producción de minerales. Otras fuentes de emisiones

en menor grado son la Industria Química, la producción de metales, el consumo de halocarbonos y exafluoruro de azufre. La fermentación entérica produce la mayor parte de Metano en la atmósfera.

Otros contaminantes en menor grado son el manejo de estiércol, el cultivo de arroz, los suelos agrícolas, la quema de residuos agrícolas, deposición de residuos sólidos en el suelo, el manejo de aguas residuales y la incineración de residuos.

Residuos

En cuanto a los residuos sólidos urbanos se generaron un total de 5,238 Ton/año en el 2009, siendo Nuevo León el mayor generador de este tipo de residuos. La cantidad de basura recolectada en total fue de 13,389 Ton al día, siendo nuevamente Nuevo León el de mayor incidencia. Nuevo León el estado que mayor población concentra.

Protección y gestión ambiental

Dentro de las áreas protegidas existen diferentes clasificaciones, por ejemplo, áreas de protección a flora y fauna (APFyF), donde existen 2,248,234 ha protegidas en el año 2010. Áreas de protección a los recursos Naturales un total de 1,705,377 ha. Dentro de los monumentos naturales se protegieron 7,681 ha, 186,510 ha de Parque Natural. Asimismo se protegieron 652,537 ha de reservas para la biosfera 31 ha de santuario natural esto último en el estado de Tamaulipas. Los estados de Chihuahua y Coahuila son los estados que más áreas designaron para protección de flora y fauna y protección a los recursos naturales respectivamente.

Al año 2009 la Profepa Identificó 13 áreas forestales críticas y existen 36 municipios o áreas naturales protegidas involucradas, este número es menor con respecto al año 2008.

Como se puede concluir con las estadísticas de los estados dentro de la RHA VI en cuanto a medio ambiente se observa una amplia riqueza de sus ecosistemas. Asimismo de los números observados se identificó la necesidad de realizar planes de ordenamiento territorial para no incrementar las problemáticas de las zonas donde se pretende realizar el crecimiento económico y no generar desarrollo en zonas vulnerables a la sequía.

Finalmente la sobreexplotación de los recursos naturales que se tiene en la zona es un factor importante que podría causar contingencias ambientales en caso de no controlarse.

4.7 BALANCES HÍDRICOS.

4.7.1 AGUA SUPERFICIAL.

Dado que el agua es un recurso vital para la supervivencia humana y juega un papel preponderante en todas sus actividades; se considera de utilidad, en cuanto a las aguas superficiales, conocer continuamente la disponibilidad de volúmenes almacenados en las principales presas del país, que se utilizan para riego, agua potable, generación de energía eléctrica y otros usos; así como, saber los gastos que circulan por los ríos más importantes del territorio nacional.

El procedimiento para calcular la disponibilidad viene en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. El cálculo se hace con base en las siguientes ecuaciones:

$$Ab = Cp + Ar + R + Im - (Uc + Ex + Ev + Av)$$

Ecuación 1

$$D = Ab - Rxy$$

Ecuación 2

Dónde:

Cp.- Volumen medio anual de escurrimiento natural

Ar.- Volumen medio anual de escurrimiento desde la cuenca aguas arriba

Uc.- Volumen anual de extracción de agua superficial

R.- Volumen anual de retornos

Im.- Volumen anual de importaciones

Ex.- Volumen anual de exportaciones

Ev.- Volumen anual de evaporación en embalses

Av.- Volumen anual de variación de almacenamiento en embalses

Ab.- Volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo

Rxy.- Volumen anual actual comprometido aguas abajo

D.- Disponibilidad media anual de agua superficial en la cuenca hidrológica

De acuerdo al documento publicado en el Diario Oficial de la federación DOF: 19/01/2009 en donde se publica la disponibilidad para la región hidrológica 34 y el documento DOF: 02/06/2011 donde se publica la disponibilidad para la región hidrológica 24 se tiene los siguientes balances hídricos de agua superficial en la región.

Como se observa en la *Figura67*, dentro de la región hidrológica administrativa se encuentran las regiones hidrológicas Bravo - Conchos y Cuencas cerradas del norte, 24 y 34 respectivamente, que son las predominantes. De igual manera se encuentran partes de las regiones hidrológicas San Fernando - Soto la Marina, Mapimi y el Salado, con número de región hidrológica 25,35 y 37.

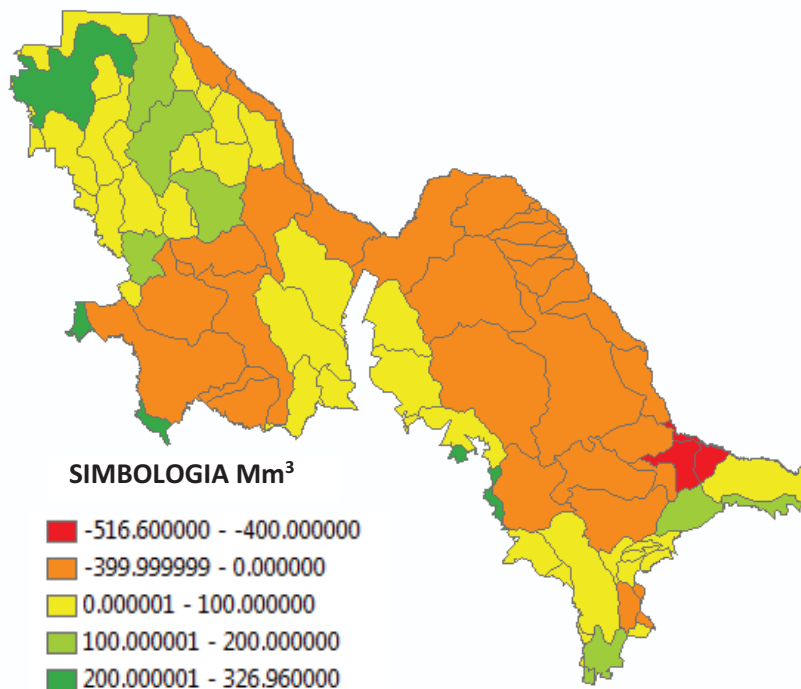


Figura67 Disponibilidad de agua superficial en la RHA VI.
Fuente: (DOF, 2013)

Se observa que en la región Río Bravo no existe disponibilidad actualmente, incluso teniendo el caso crítico de las regiones Río San Juan 3 y río Bravo 12 que tienen un gran problema de sobreexplotación. La región hidrológica 34 no presenta problemas de déficit al igual que las demás cuencas hidrológicas a excepción de la cuenca del río Blanco en la parte Sureste de la RHA VI. En resumen la RHA VI tiene un déficit general de 11,041 Mm³.

4.7.1 AGUA SUBTERRÁNEA.

El subsuelo mexicano aloja gran número de acuíferos que son importantes fuentes de agua que funcionan a la vez como vasos de almacenamiento, redes de acueductos y plantas de tratamiento naturales. Se han definido 653 acuíferos para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo.

La CONAGUA a través del Diario Oficial de la Federación ha publicado la disponibilidad de los acuíferos en el país, a continuación se presentan la disponibilidad de los acuíferos en la RHA VI.

La obtención de la disponibilidad de agua subterránea se obtuvo aplicando la siguiente ecuación.

$$\text{Recarga total} - \text{Descarga total} = \text{Cambio de almacenamiento}$$

Ecuación 3

La ecuación de balance definida es:

$$Rv + Ri + Eh - B - Sh = \pm \Delta V(S)$$

Ecuación 4

Dónde:

Rv = Recarga vertical [m3]

Ri = Recarga inducida, [m3]

Eh = Entradas por flujo subterráneo, [m3]

B = Bombeo, [m3]

Sh= Salidas por flujo subterráneo horizontal, [m3]

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento, [m3]

Las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento de un acuífero:

De acuerdo a esta ecuación la Conagua realizó el balance de los 101 acuíferos que existen en la zona, obteniendo lo siguiente (ver *Figura68*).

- 33 acuíferos sobreexplotados.
- 10 acuíferos sin disponibilidad.
- Mayor déficit en los estados de Chihuahua y Coahuila.
- Disponibilidad Total 1,690 Mm³ Año.
- Déficit Total -1,593 Mm³Año.

De la *Figura67* y la *Figura68* se concluye que en general la RHA VI tiene un grave problema de estrés hídrico.

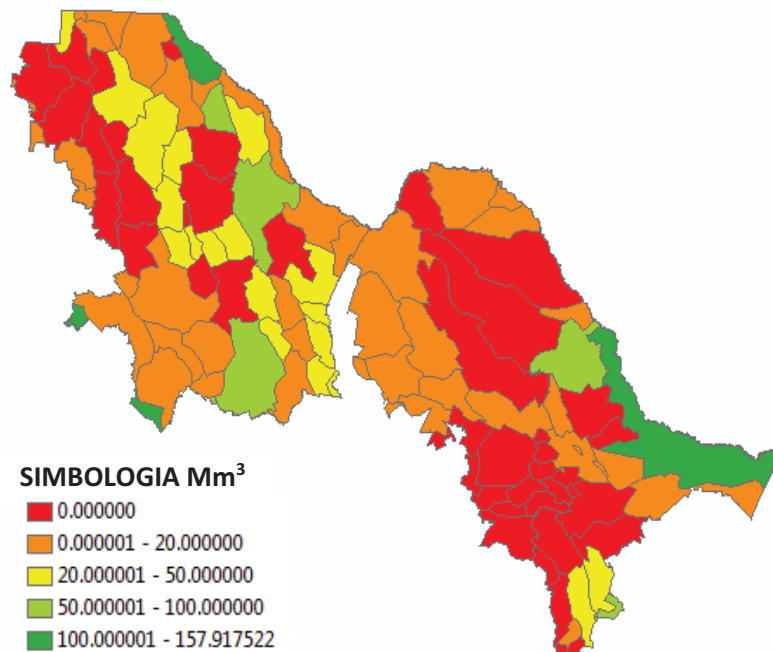


Figura68 Disponibilidad de agua subterránea en la RHA VI.

Fuente: (DOF, 2013)

4.8 EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS.

En la región hidrológica Río Bravo el principal evento extremo que se observa con mayor recurrencia e impacto es el de la sequía. Este fenómeno tiene la particularidad de ser lento y silencioso por lo que resulta más difícil de predecir y de mitigar que el de las inundaciones.

Para enfrentar este fenómeno es necesario una planeación y regulación de los diversos mecanismos de gestión para un uso más eficiente del agua como se presenta en la *Figura69*.

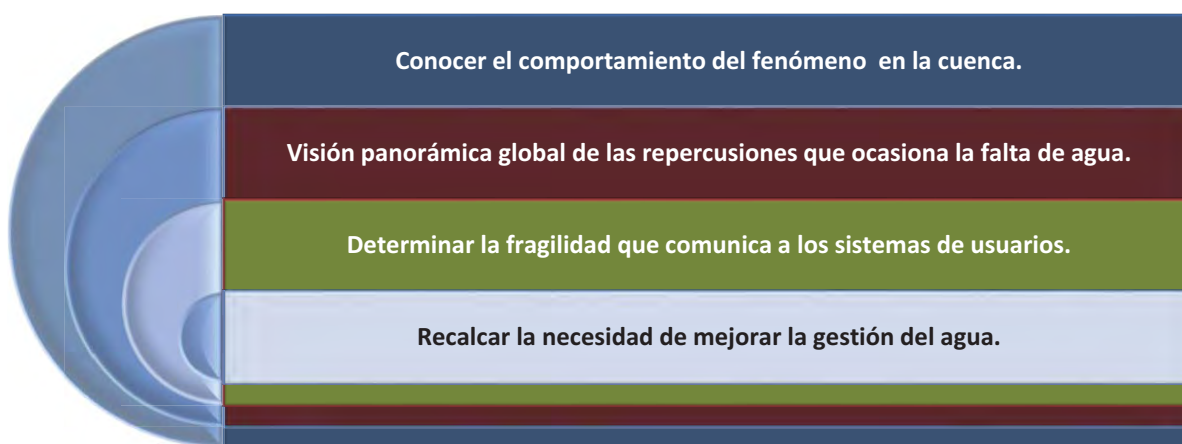


Figura69 Acciones de gestión del agua para mitigar efectos de las sequías.
Fuente: Elaboración propia.

La sequía es un fenómeno natural complejo y altamente elusivo. En su fase más avanzada, en la sequía hidrológica, los impactos son más severos, costosos, de larga y lenta recuperación, pues afecta los embalses y los acuíferos. Caracterizar dicho fenómeno significa estimar sus parámetros básicos: severidad, duración, recurrencia y extensión. Ante la dificultad de modelar y pronosticar la sequía, la mejor opción para afrontarla es la prevención, mediante un plan de preparación, que especifique y establezca los roles y responsabilidades de gobierno, usuarios del agua y sociedad.

Las medidas no estructurales adquieren más relevancia que las estructurales, como el diseño y ejecución de políticas de operación de embalses, acuíferos, bombes de corrientes y combinadas.

Planear y asumir el riesgo siempre será mucho más efectivo que soportar la crisis; la diferencia se manifiesta en la superación del problema o el colapso.

A continuación en la *Figura70* se presentan los episodios de sequías del 2010 al 2013 en la RHA VI calculados por el Monitor de Sequías de América del Norte.

INTENSIDAD DE LA SEQUÍA

Sin Sequía
 Anormalmente Seco
 Sequía Moderada
 Sequía Severa
 Sequía Extrema

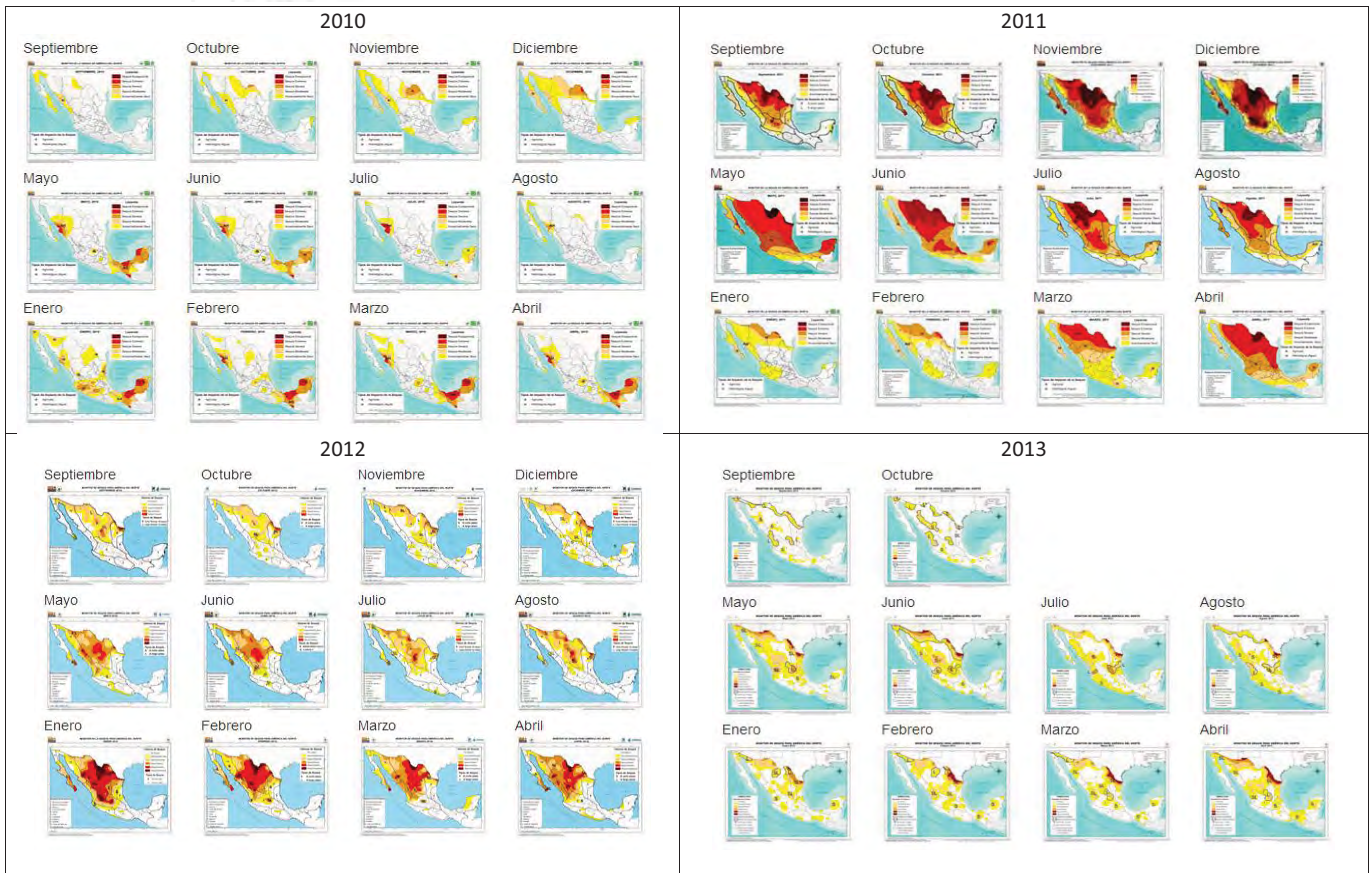


Figura70 Comportamiento de la sequía para los años 2010-2013 la RHA VI.
 Fuente: SAGARPA. 2013.

En cuanto a los principales ciclones tropicales se han registrado 17 eventos de diferente magnitud que han golpeado directamente en el área de la región en el periodo 1970-2010. En la *Figura71* se presenta el número de evento, el nombre y su categoría al momento de tocar la región.

Numero de evento	Nombre	Categoría	Año
16	Allen	H1	1980
17	Barry	H1	1983
18	Ericka	H1	2003
19	Fern	TT	1973
82	Claudette	DT	2003
290	Claudette	DT	2003
291	Celia	TT	1970
292	Charley	DT	2004
293	Bret	DT	1999
294	Delia	DT	1973
295	Celia	TT	1970
296	Gilbert	DT	1988
297	Claudette	DT	2003
298	Lidia	H2	1993
334	Dolly	TT	2008
349	Hermine	TT	2010
352	DT 2	DT	S/D

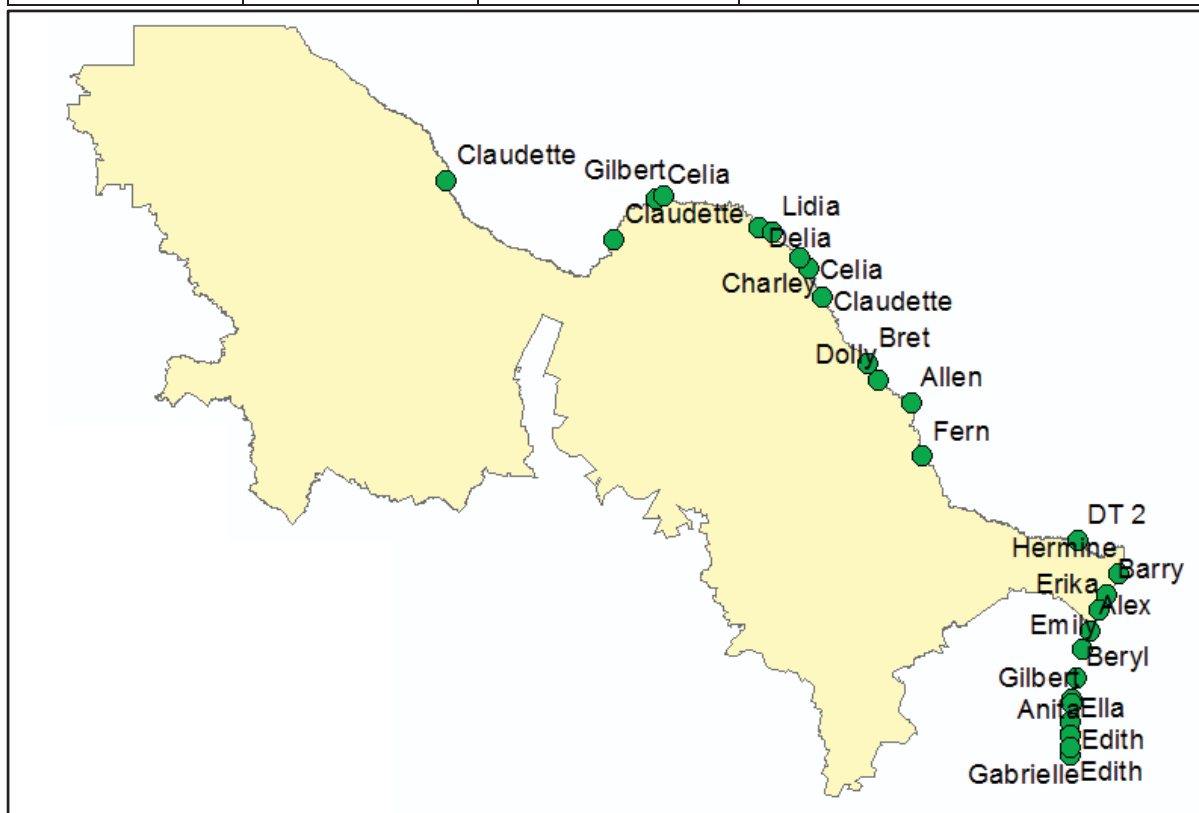


Figura71 Principales ciclones de 1970 a 2010 en la RHA VI.
Fuente: (CONAGUA, 2013).

4.9 EVALUACIÓN DE LAS PRINCIPALES PROBLEMÁTICAS.

La cuenca del río Bravo se caracteriza por ser una cuenca hidrológica con un alto grado de variación en la disponibilidad del recurso hídrico. Las condiciones climáticas definen a esta región transfronteriza como una zona árida y semiárida donde la escasez del vital líquido se convierte en un problema ambiental público dado el crecimiento económico de la región y la competencia por el agua entre los usuarios principalmente agrícolas, tanto de la parte alta y baja de la cuenca, como de ambos lados de la línea fronteriza que divide a México de los Estados Unidos de América.

De los puntos abordados en el presente capítulo se puede concluir que las mayores problemáticas que se presentan en la región son:

- La escases natural del recurso en la región manifestada en la menor disponibilidad de agua por habitantes.
- El uso ineficiente del agua que agrava la escases y crean conflictos entre usuarios.
- La poca información y desigual distribución con que cuentan las estaciones existentes en la región tanto pluviométricas como hidrométricas.
- La contaminación, sobre todo porque los efluentes municipales e industriales degradan la calidad del agua.
- La sobreexplotación de acuíferos que implica la extracción de agua en ocasiones no renovable.
- La sobreexplotación de los recursos naturales.
- El crecimiento de zonas pobladas e industriales en zonas donde la disponibilidad de agua es mínima o nula.
- Las reiteradas etapas de sequía en la región.

De las problemáticas observadas es importante atender los siguientes puntos para un mejor manejo del recurso hídrico.

- Incrementar la infraestructura de medición en la región hidrológica.
- Identificar las zonas más peligrosas y las zonas más vulnerables al fenómeno de la sequía así como monitorear dichas zonas.
- Incrementar sustancialmente la eficiencia en el uso agrícola.
- Informar, capacitar y reusar el agua.
- Aplicar instrumentos de mercado y de sanciones correspondientes ante un uso no sustentable del agua en el uso agrícola, equilibrando de acuerdo al área sembrada.
- Reducir la parte de agua no contabilizada en los sistemas de agua potable de las principales ciudades en la región y revisar el sistema tarifario.
- Estabilizar y restaurar el equilibrio en los acuíferos sobreexplotados.

- Incentivar económicamente, concertar entre usuarios y reducir las extracciones.
- Controlar las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Ampliar el programa por servicios ambientales.
- Realizar estudios de impacto ambiental en la zona y reducir los permisos de cambio de uso del suelo.
- Incrementar los sitios para manejo de residuos sólidos, así como informar a la población de la ubicación de dichos sitios.
- Construir tanques de captación de agua en zonas estratégicas.
- Eficientar la generación de energía del tipo hidroeléctrica y buscar nuevas fuentes de energía limpia y renovable.

5. CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA EN LA REGIÓN.

Como se describió en capítulos pasados la importancia de contar con indicadores de sequía meteorológica, hidrológica u operacional es relevante para la toma de decisiones, puesto que cada indicador proporciona información de diversa índole que es vital para diversos fines, los cuales están orientados al aprovechamiento del recurso hidráulico.

Con base en los índices analizados, el tipo de sequía que se busca caracterizar, la información del recurso disponible y las estadísticas de la región se decidió hacer uso de las siguientes metodologías para crear la caracterización de la sequía en la región hidrológica Administrativa VI Río Bravo:

1. Para la identificación de la sequía meteorológica se utilizó el Standard Precipitación Índice (SPI) mismo que se obtuvo para las escalas de 1, 3, 6, 9, 12 y 24 meses.
2. Para la sequía hidrológica se utilizó la información de almacenamientos y entradas a las principales presas de la región, haciendo uso del indicador Stream Drought Índice (SDI).

A continuación se detalla cada uno de los índices y el manejo de la información para su uso.

5.1 ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTÁNDAR (SPI).

McKee et al. desarrollaron el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) con el propósito de definir y monitorear sequías. La naturaleza del SPI permite determinar el grado de sequía y eventos de anomalías de humedad en una escala de tiempo particular.

El cálculo del SPI tiene como base una función de densidad de probabilidad Gamma. Los parámetros α y β son estimados para cada estación y para cada escala de tiempo (1 mes, 3 meses, 6 meses, 9 meses, 12 meses y 24 meses en el presente caso), y para cada mes del año. Los parámetros resultantes son utilizados para encontrar la probabilidad acumulada de un evento de precipitación dado para el mes y la escala de tiempo de análisis.

Posteriormente la probabilidad acumulada $H(x)$ es transformada a una variable normal estandarizada con media cero y varianza uno, cuyo valor es el del SPI.

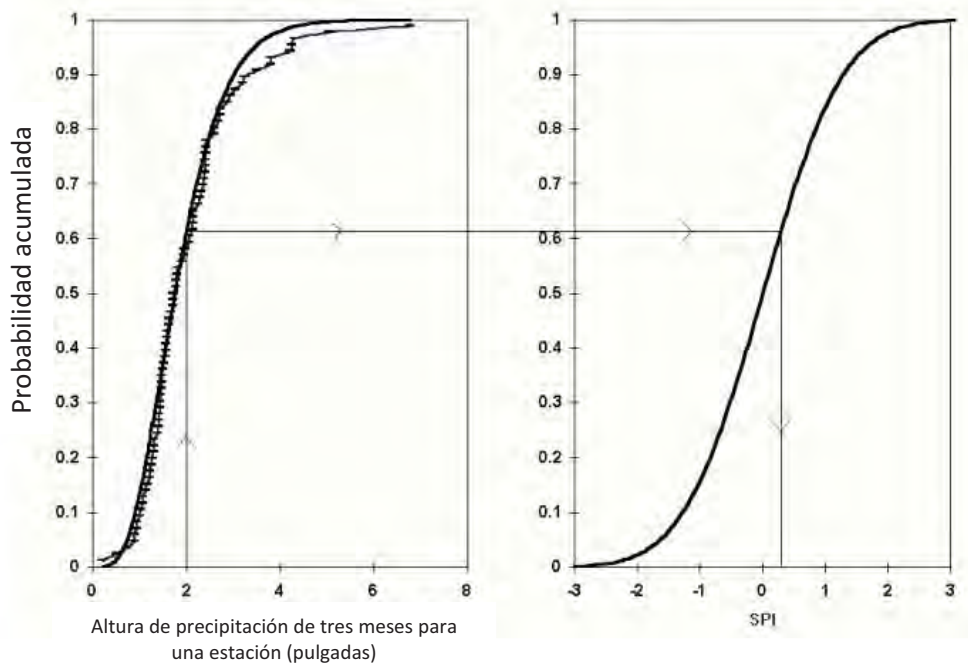


Figura 72 Ejemplo de la transformación de equiprobabilidad de la distribución Gamma ajustada a la distribución normal estandar.

Fuente: (McKee et al, 1993)

En la *Figura74* la curva lisa de la izquierda denota la distribución de la probabilidad acumulada de la distribución gamma ajustada a los datos de precipitación acumulada mensual. La curva lisa de la derecha denota la distribución de probabilidad acumulada de la variable aleatoria normalizada Z.

El valor del SPI es más fácilmente obtenido usando una aproximación propuesta por Abramowitz y Stegun en 1965 que convierte la probabilidad acumulada a la variable normalizada Z a través de la siguiente expresión:

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + c_3 t^3} \right) \text{ para } 0 < H(x) < 0.5$$

Ecuación 5

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + c_3 t^3} \right) \text{ para } 0 < H(x) < 0.5$$

Ecuación 6

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

Ecuación 7

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

Ecuación 8

El valor de los coeficientes de las ecuaciones Ecuación 5 y Ecuación 6 son:

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

En la *Tabla 18* se muestra la clasificación del SPI.

Tabla 18 Clasificación del SPI por categorías y su probabilidad de ocurrencia.

Valor del SPI	Categoría	Probabilidad (%)
2.00 o mayor	Extremadamente húmedo	2.3
1.50 a 1.99	Muy húmedo	4.4
1.00 a 1.50	Moderadamente húmedo	9.2
-0.99 a 0.99	Normal	68.2
-1.00 a -1.50	Sequía moderada	9.2
-1.50 a -2.00	Sequía intensa	4.4
-2.00 o menor	Sequía extrema	2.3

Fuente: McKee et al, (1995).

Aspectos relevantes del SPI.

- Herramienta para definir y monitorear sequías, detecta la ocurrencia de una sequía a una escala de tiempo determinado.
- No es una herramienta de predicción, sino de detección y evaluación.
- Es adimensional por ser la desviación estandarizada de valores de una población normal estándar.
- Es relativo a las características de lluvia en la zona, por el hecho de estandarizar la lluvia en la zona pudiendo de esta manera comparar las variaciones de lluvia en distintas regiones.
- Por su adimensionalidad se puede comparar mejor que en términos de alturas de precipitación.

El SPI se obtiene comparando los valores de lluvia con los valores registrados de un periodo contra los siguientes periodos de análisis. Para obtener el SPI para 3 meses se compararan el valor acumulado de Enero-Febrero-Marzo, con los acumulados de Febrero-Marzo-Abril, y de esta manera se hace para las demás escalas y periodos de tiempo. Así el SPI₃ no contará con datos hasta el tercer mes de análisis. El SPI₆ contara con datos hasta el sexto mes y así sucesivamente (ver *Figura73*).

MES DE REGISTRO	REGISTRO MENSUAL DE PRECIPITACIÓN	SPI ₁	SPI ₃
Ene -1998	12	1.0	
Feb-1998	11	0.7	
Mar-1998	7	-0.5	0.55
Abr-1998	15	1.2	0.10

Figura73 Ejemplo de análisis para obtención de SPI.
Fuente: Elaboración propia con información del SMN.

Uso y Validación de la información.

Para la implementación del SPI se propuso el uso de la información climatológica de algunas de las estaciones que se encuentran en la cuenca. Lo anterior derivado de que no todas las estaciones cuentan con información completa o actual como se vio en el capítulo 3. Asimismo por la naturaleza del fenómeno se definió que por su amplia extensión permite eliminar del análisis algunas de las estaciones climatológicas, cuidando que exista una buena representatividad de las estaciones en la región. Por lo anterior se decidió hacer uso de las estaciones climatológicas que se muestran en la *Figura74* y en la *Tabla 19* las cuales coinciden con el Monitor de Sequía de América del Norte.

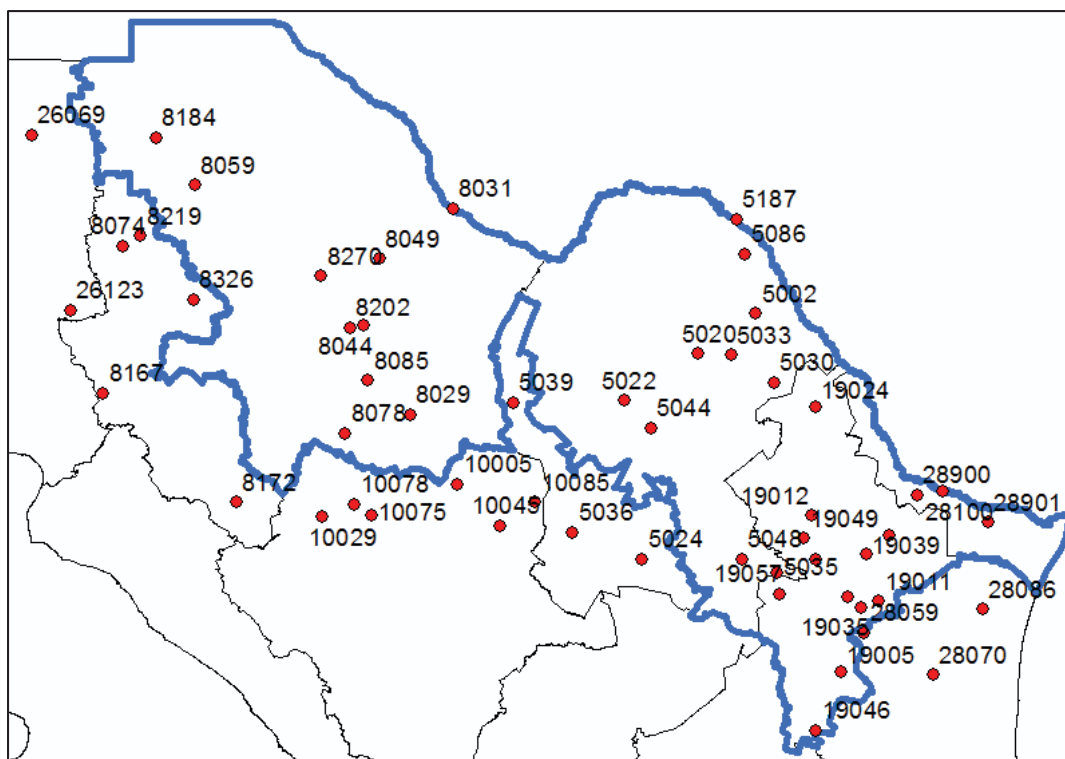


Figura74 Estaciones climatológicas utilizadas para obtención de SPI.
Fuente: Elaboración propia con información de (CONAGUA, 2013).

Tabla 19 Estaciones climatológicas utilizadas para obtención de SPI.

EST	NOMBRE	ESTADO	EST	NOMBRE	ESTADO
5002	Allende	Coahuila	8326	Presa Abraham González	Chihuahua
5020	Muzquiz	Coahuila	10005	Ceballos	Durango
5022	Ocampo	Coahuila	10029	Guanacevi	Durango
5024	Parras, Parras	Coahuila	10045	Mapimi	Durango
5030	Presa Venustiano Carranza	Coahuila	10075	Santa María del oro	Durango
5033	Sabinas (DGE), Sabinas	Coahuila	10078	Sardinas, San Bernardo	Durango
5035	San Antonio las alazanas	Coahuila	10085	Tlahualilo	Durango
5036	San Pedro	Coahuila	19005	Aramberri	Nuevo León
5039	Sierra mojada	Coahuila	19007	Cabezones	Nuevo León
5044	Cuatro Ciénegas	Coahuila	19011	Cerro prieto, Linares	Nuevo León
5048	Saltillo (DGE), Saltillo	Coahuila	19012	Ciénega de flores	Nuevo León
5086	Presa San Miguel	Coahuila	19016	El cuchillo, China	Nuevo León
5187	Presa La Amistad	Coahuila	19024	Anáhuac	Nuevo León
8029	Jiménez Puente, Jiménez	Chihuahua	19035	Camacho	Nuevo León
8031	Ojinaga	Chihuahua	19039	Las Enramadas	Nuevo León
8044	Delicias (DGE), Delicias	Chihuahua	19046	Mier y noriega	Nuevo León
8049	Luis L. León	Chihuahua	19049	Monterrey (DGE).	Nuevo León

EST	NOMBRE	ESTADO	EST	NOMBRE	ESTADO
8059	El tintero	Chihuahua	19057	San Rafael	Nuevo León
8074	Guapoca	Chihuahua	19069	La Boca, Santiago	Nuevo León
8078	Parral	Chihuahua	26069	Presa La Angostura (SMN),	Sonora
8085	La Boquilla, San Francisco	Chihuahua	26123	Yecora (SMN), Yecora	Sonora
8167	Chinipas (SMN), Chinipas	Chihuahua	28059	Magueyes, Mainero	Tamaulipas
8172	Guadalupe y calvo	Chihuahua	28070	Padilla, Padilla	Tamaulipas
8184	Nuevo Casas Grandes (DGE)	Chihuahua	28086	San Fernando	Tamaulipas
8202	Presa Francisco I. Madero	Chihuahua	28100	S-j-2-18 Díaz Ordaz	Tamaulipas
8219	Peñitas	Chihuahua	28900	Presa Marte R. Gómez	Tamaulipas
8270	La mesa	Chihuahua	28901	Rio Bravo	Tamaulipas

Fuente: *Elaboración propia.*

Para corroborar la información utilizada para la obtención de los índices de sequía mediante el SPI se hicieron diversas pruebas a los datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), mismos que a su vez se les realizaron pruebas de confianza por parte de especialistas del SMN.

Dentro de las pruebas realizadas a los datos proporcionados se revisó la consistencia de los registros de lluvia con los periodos de estiaje y de lluvias, asimismo el comportamiento estandarizado acumulado de la lluvia para conocer correspondencia de cada una de las estaciones con las demás. De lo anterior se confirmó la validez de los datos de inicio.

Obtención del SPI

En esta etapa se hizo uso del programa SPI.exe el cual es un programa que corre en ambiente DOS y trabaja con la metodología del SPI. (Ver anexo 1). Dicho programa fue realizado por el NDMC (National Drought Mitigation Center) y probado por especialistas del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Para hacer uso de este programa se tuvo que realizar un completado de datos faltantes de acuerdo al documento “Técnicas de completado de series mensuales y aplicación al estudio de la influencia de la NOA en la distribución de la precipitación en España” (Barrera, 2004) donde hace un análisis de las metodologías de completado de datos de acuerdo al tipo de variable meteorológica que se tenga. Para el presente trabajo de investigación se aplicó el uso de dos metodologías de completado de datos:

a) Método univariado, Autocorrelación (Criterio del valor medio).

Este método consiste en sustituir la carencia de un registro por el valor medio de la serie, o del mes en cuestión; en este caso por tratarse de valores mensuales. Es de esperar que este método sólo sea útil y fiable para series cuyos coeficientes de variación sean lo más pequeño posible, inferiores al 5%, o lo que es lo mismo, para series con desviaciones típicas mucho menores que su valor medio.

b) Método multivariado por correlación múltiple (CORMUL).

Este método es válido para el completado de series homogéneas y tal que su autocorrelación temporal de los datos sea alta. Para lo anterior se utilizan los datos de otras series que presenten una alta correlación con la serie de datos que se requiere completar. Cuanto mayor sea el número de series, menor será la sensibilidad al error en una de ellas. El método suele utilizarse para el completado de datos mensuales y por lo tanto requiere que se trabaje con valores normalizados mensualmente. En este punto se implementó el uso del programa CHAC elaborado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas de España.

De lo anterior se obtuvo que con la metodología 1 los valores obtenidos de SPI para los periodos faltantes no eran reales, eran supuestos por lo que no se garantizaba la validez de los resultados de dichos periodos.

De la segunda metodología se puede concluir que no es adecuada para completar los datos de este estudio, debido a que existen estaciones con un amplio rango de meses que no cuentan con información imposibilitando el uso de dicha herramienta.

Por lo anterior se decidió trabajar únicamente con los datos de SPI generados por el Servicio Meteorológico Nacional, en el que los meses con registros faltantes no son calculados, siendo más realista los resultados obtenidos. Los resultados del SPI proporcionados por el SMN se compararon con los obtenidos mediante el uso del programa SPI.exe y completados con la metodología de criterio del valor medio. Los resultados obtenidos confirmaron los resultados del SPI obtenidos por el SMN obteniendo variaciones mínimas, lo cual se puede deber a que el SMN no rellena datos con ningún tipo de metodología, sólo hace uso de los registros existentes.

De esta manera se concluyó que se haría uso del SPI calculado por el SMN para cada una de las estaciones dentro y cercanas a la región hidrológica Río Bravo que integran el monitor de Sequías de América del Norte habiendo analizado un total de 54 estaciones.

El SPI para las estaciones analizadas se obtuvo para escalas temporales de 1, 3, 6, 9, 12 y 24, con la intención de generar un análisis más detallado y extenso de series

temporales, el beneficio de generar el SPI a diversas escalas de tiempo se muestra a continuación.

Interpretación de las escalas de tiempo del índice de precipitación estandarizado.

Las características de la sequía obtenidas del cálculo del SPI se pueden interpretar de diversas formas de acuerdo a la escala temporal analizada. Incluso en estudios previos realizados por el NADM se contempla la posibilidad de comparar dichas características obtenidas por el SPI con las obtenidas por otros métodos. Asimismo con los resultados del SPI se puede tener una idea del comportamiento de algunas otras variables como se muestra a continuación.

Interpretación de las características de la sequía para la escala temporal de 1 mes.

- ✓ Muy similares a las obtenidas por el porcentaje de precipitación normal para 1 mes.
- ✓ Se pueden relacionar con los datos de la humedad del suelo a corto plazo.
- ✓ Se puede utilizar como indicador del estrés en cultivos.
- ✓ Puede ser engañoso porque en un evento extraordinario puede hacer pensar que se acabó la sequía, siendo erróneo pues esto puede deberse a eventos de lluvia extraordinaria o sitios donde llueve poco en un determinado mes, y estos eventos extraordinarios pueden producir alteraciones fuertes en el resultado del SPI.
- ✓ Puede exagerar el resultado en meses y lugares secos, esto en el caso de lluvias atípicas.

Interpretación 3 meses.

- ✓ Compara la precipitación total de 3 meses consecutivos de un año con la lluvia de acumulada de 3 meses consecutivos de todos los años con registros.
- ✓ Refleja a corto y mediano plazo condiciones de humedad y provee información estacional de la lluvia.
- ✓ Puede ser más aplicable para obtener condiciones de humedad disponible que la lenta respuesta del índice de palmer, esto conociendo previamente las características de la zona, basando en los valores de lluvia.
- ✓ Se recomienda ubicarlo y compararlo con periodos de tiempo más amplios ya que puede engañar que hay mucha humedad al final de un periodo de sequía prolongado.

- ✓ Puede ser malinterpretado en regiones donde es normalmente seco durante 3 meses o más, esto debido a la mayor sensibilidad del cálculo para meses donde la precipitación es baja o nula.

Interpretación 6 meses.

- ✓ Su resultado indica en términos medios la tendencia en la precipitación y es considerada ser más sensible en sus resultados a las condiciones en esta escala que los resultados del índice de palmer.
- ✓ Puede ser efectivo mostrando la precipitación en distintas temporadas, el SPI calculado presenta una menor sensibilidad a las variaciones de lluvia, considerando que al tomar un rango más amplio de meses se espera una mayor consistencia en las lluvias de entrada para el cálculo del SPI.
- ✓ Puede ser asociada con anomalías en corrientes y almacenamientos, pues al disminuir o aumentar la lluvia en un periodo largo, en este caso 6 meses, se cree presenta un comportamiento similar a las variaciones en los cuerpos de agua.

Interpretación 9 meses.

- ✓ Indica patrones de comportamiento a una escala media de tiempo.
- ✓ Las sequías usualmente toman uno o más estaciones del año para su desarrollo.
- ✓ Valores por debajo de -1.5 para este periodo son usualmente un buen indicador de que impactos bastantes significantes han ocurrido en la agricultura y en algunos otros sectores.

Interpretación 12 meses

- ✓ Refleja patrones de precipitación a largo plazo.
- ✓ Ligado a flujo en corrientes, niveles de aprovechamientos e incluso niveles freáticos.
- ✓ En Estados Unidos este índice a esta escala de tiempo está muy cercano o parecido a Palmer. En México este índice fue estudiado en el artículo “Evaluación de índices de sequía en las cuencas de afluentes del río Bravo /Grande” (Aparicio & Velasco, 2004) permitiendo verificar que su comportamiento es similar al índice de Palmer.

Teniendo los valores de SPI para las estaciones se procedió a generar las gráficas temporales de SPI donde se muestran las propiedades como intensidad, duración y persistencia y mediante mapas se observó la distribución espacial de la misma para diversas duraciones.

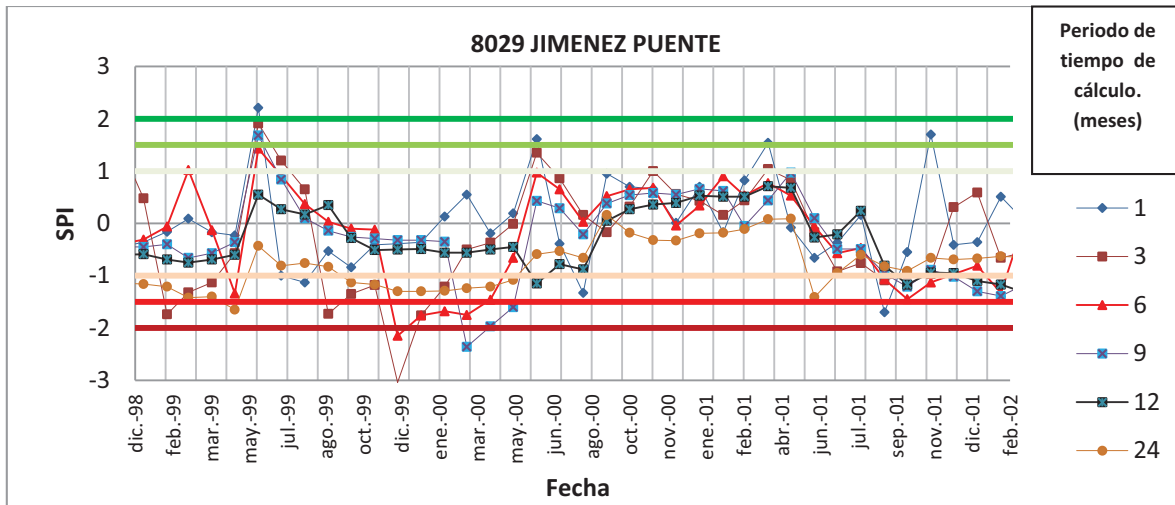


Figura75 Gráfica de comportamiento del SPI para diversos periodos de tiempo para la estación Jiménez Puente, Chihuahua.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la *Figura75* entre mayor es el periodo de cálculo del SPI se vuelve más estable su comportamiento en comparación con periodos de cálculo como el de 1 mes. Las gráficas del SPI para diversas duraciones de todas las estaciones analizadas se muestran en el anexo 2.

Con la información que se menciona en párrafos anteriores y mostrada en el anexo 2 es posible identificar las propiedades de la sequía y realizar una caracterización de la sequía meteorológica en la zona.

En la *Figura77* se muestra el número de eventos de sequía de acuerdo al cálculo del SPI para 1 mes de duración en las estaciones analizadas. Como se observa en la *Figura76* existe un mayor número de sequías para la zona del estado de Nuevo León y Tamaulipas. En específico en la franja entre los meridianos 99 y 101 de longitud oeste.



Figura76 Zona de mayor número de sequías de acuerdo al SPI 1 mes en el periodo (1980-2012).

Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior puede deberse a que esa zona es regularmente golpeada por huracanes y al chocar con la sierra madre oriental las lluvias se quedan en esa zona, lo que provoca que las variaciones tan amplias de lluvias conlleve a que en temporada de estiaje el SPI considere como sequía dichos meses. Asimismo casi no se aparecen valores de sequía extrema.

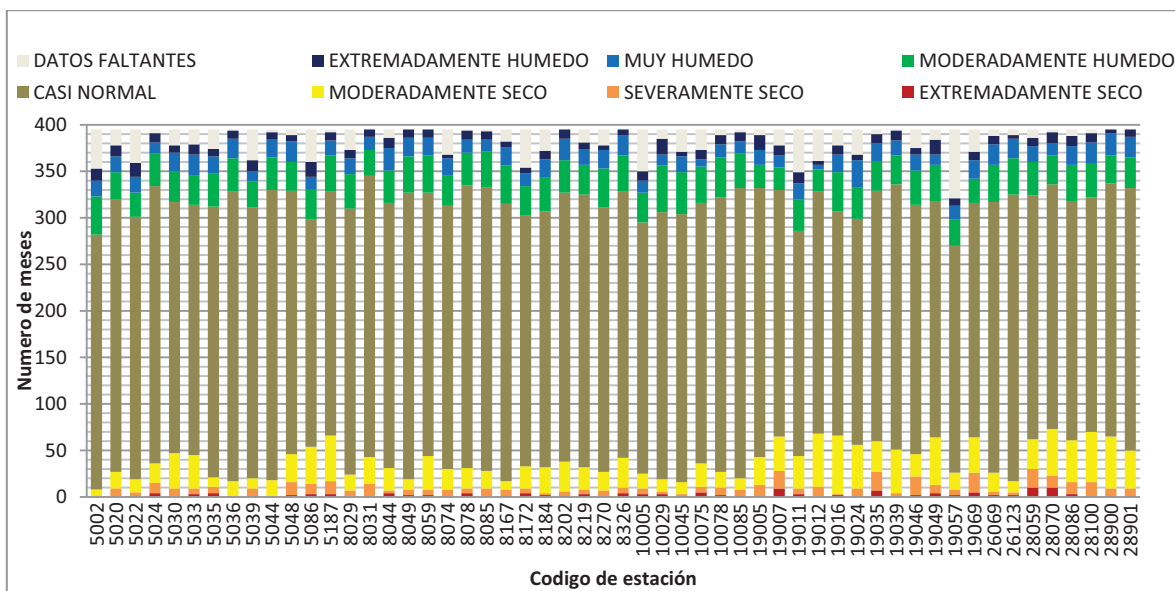


Figura77 Número y distribución de eventos de sequías según SPI para una duración de 1 mes (1980-2012).

Fuente: Elaboración propia.

Caso contrario al cálculo del SPI de 1 mes sucede con el SPI de 3 meses, donde se aprecia que ya no es la zona de Nuevo León y Tamaulipas la que mayor episodios de sequías presenta en la región. Esto debido a que el SPI para 3 meses amortigua el efecto de los meses lluviosos por el hecho de tomar promedios de lluvia para un periodo de 3 meses. Asimismo empiezan a aparecer un mayor número de sequías extremas. Las estaciones que registraron sequías durante el periodo 1980 – 2012 se encuentran más distribuidas a lo largo de la RHA como se aprecia en la Figura78.

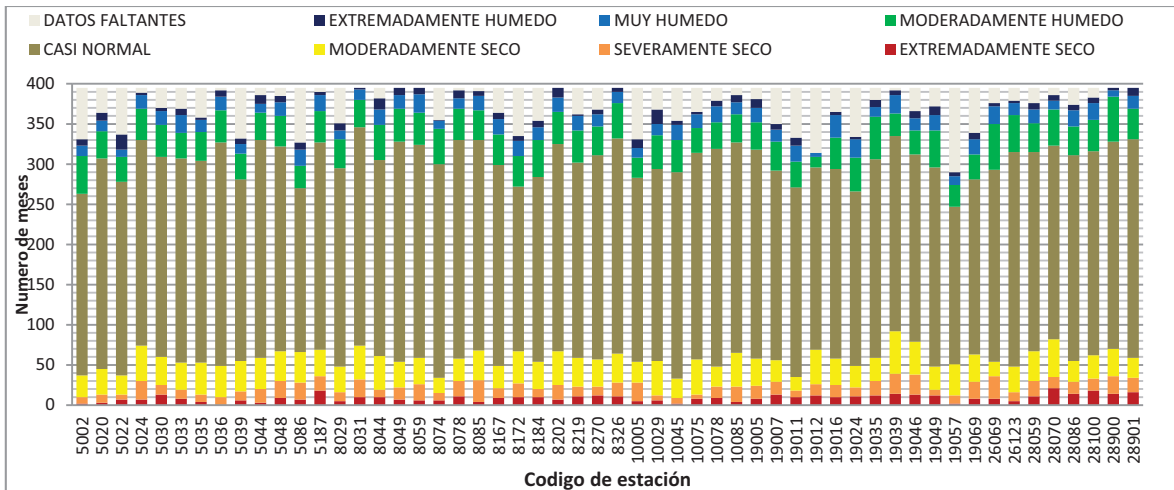


Figura78 Número de eventos de sequías según SPI para una duración de 3 meses (1980-2012).
Fuente: Elaboración propia.

Para el SPI de 6 meses se observa un comportamiento muy semejante al cálculo del SPI de 3 meses en los valores registrados en las estaciones utilizadas. El número de eventos de sequía en la región para las estaciones analizadas se encuentra en 50 eventos por estación en promedio, registrando el número máximo la estación de Ojinaga, Chihuahua con 98 meses con sequía (ver *Figura79*).

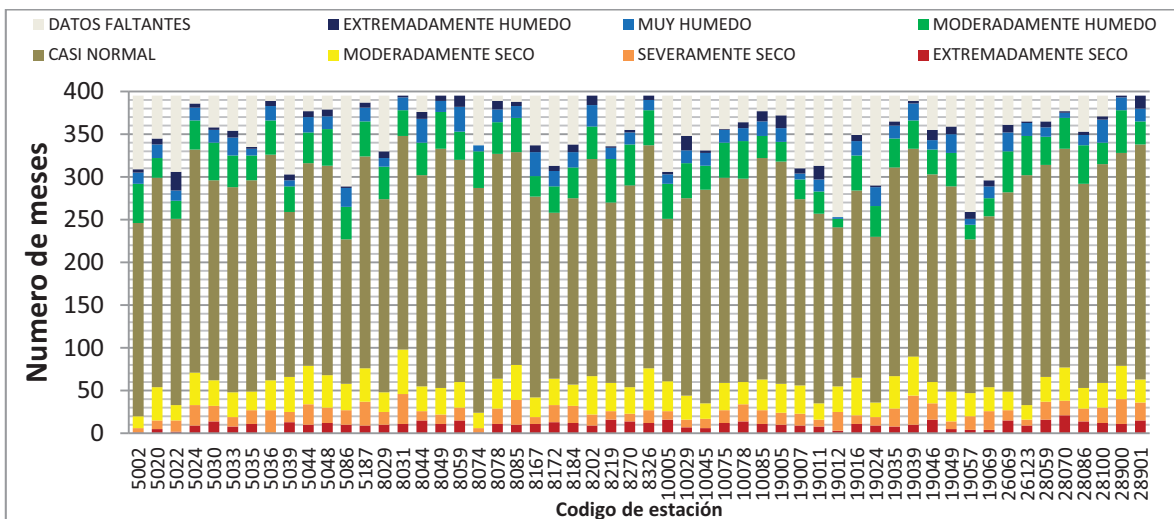


Figura79 Número de eventos de sequías según SPI para una duración de 6 meses (1980-2012).
Fuente: Elaboración propia.

Para los cálculos del SPI para los periodos de 9, 12 y 24 meses, *Figura80*, *Figura81* y *Figura82* respectivamente, no se presentan cambios significativos en el número de eventos de sequía, el comportamiento es similar al del SPI 6 meses. Adicionalmente se observa que empiezan a aparecer mayor número de eventos sin datos, esto debido a que ante un valor de lluvia no registrado en un mes, se pierde el cálculo de más

número de valores de SPI conforme aumenta el periodo de meses de cálculo, habiendo mayor número de datos faltantes para el cálculo del SPI 24 meses.

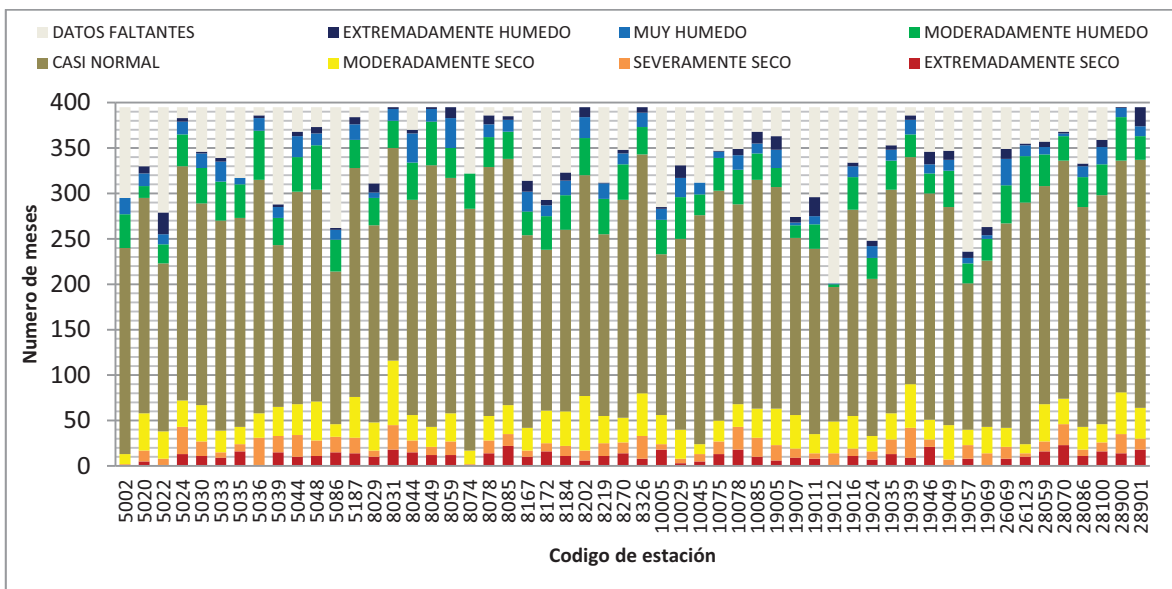


Figura80 Número de eventos de sequías según SPI para una duración de 9 meses (1980-2012).
Fuente: Elaboración propia.

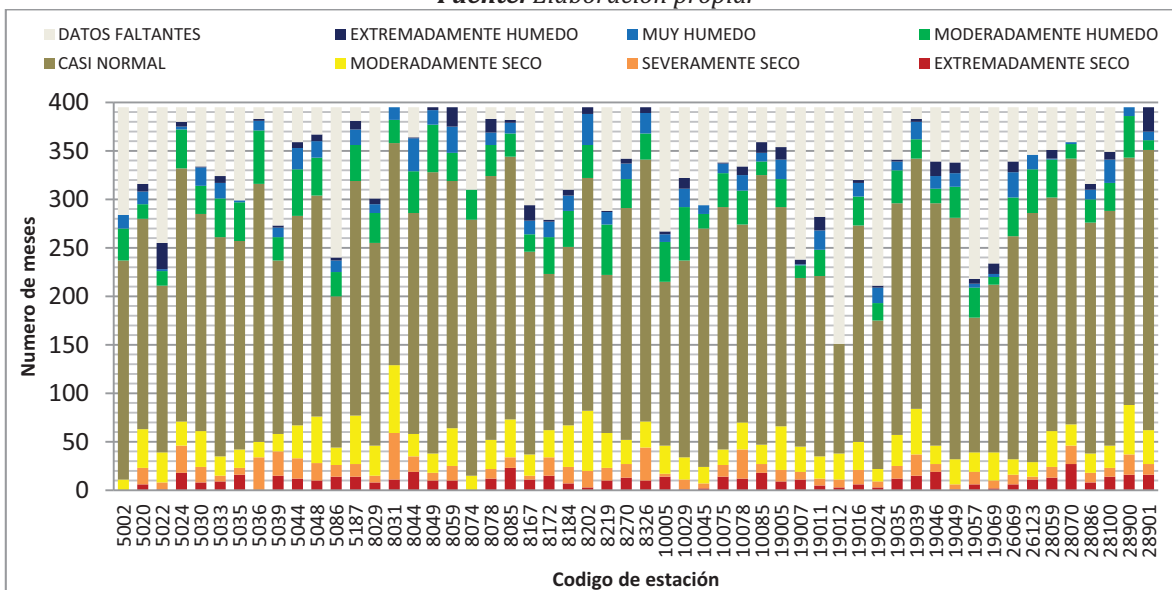


Figura81 Número de eventos de sequías según SPI para una duración de 12 meses (1980-2012).
Fuente: Elaboración propia.

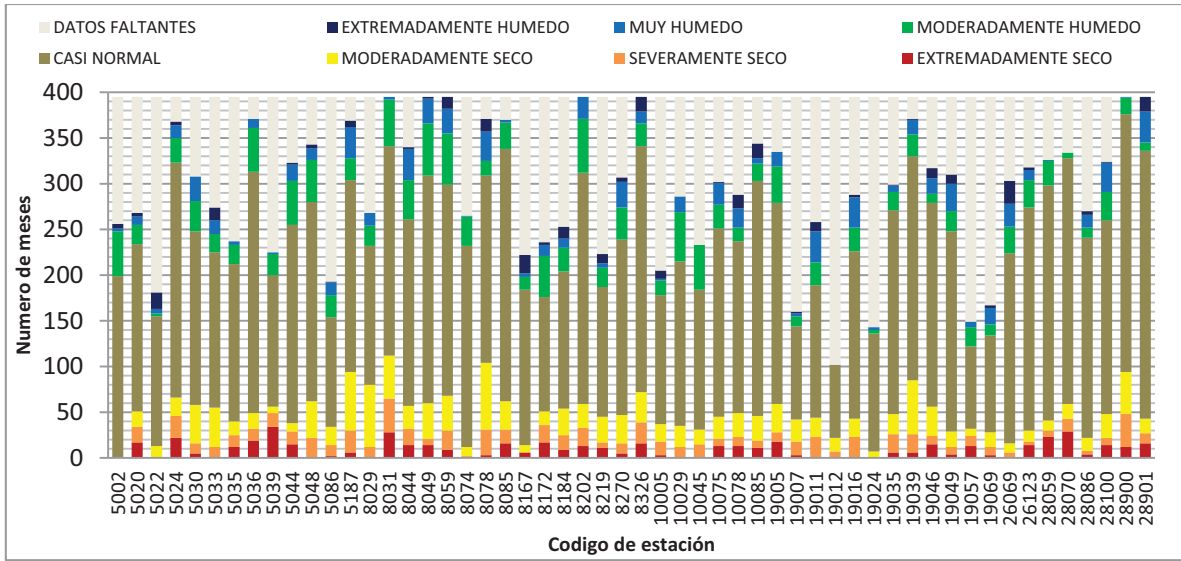


Figura82 Número de eventos de sequías según SPI para una duración de 24 meses (1980-2012).
Fuente: Elaboración propia.

De las figuras anteriores se pueden obtener las siguientes conclusiones:

Las zonas con mayor presencia de sequía en periodos de un mes se encuentran en la parte Este y en la parte Noroeste de la cuenca registrando más de 50 episodios de sequías en el periodo 1980-2012. En la *Figura83* se muestran las estaciones en color azul cielo que registraron más de 50 episodios de sequía en el periodo 1980-2012 de acuerdo al cálculo del SPI₁. En la *Figura83* los puntos en amarillo son las estaciones con mayor número de eventos de sequía extrema.

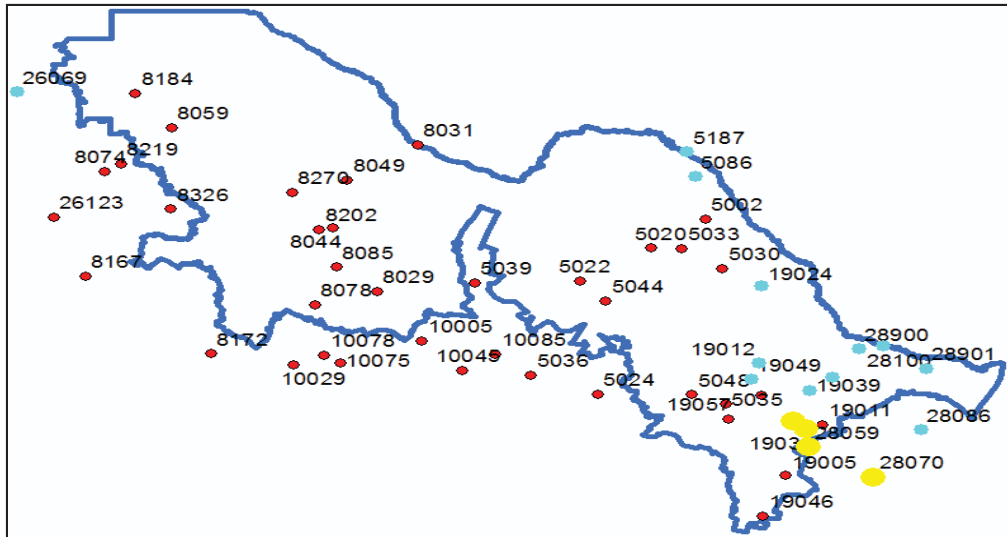


Figura83 Recurrencia de meses con sequía según SPI de 1 mes para el periodo (1980-2012).
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar la zona este de la RHA padece más recurrentemente este efecto y en especial la región Sureste padece más sequías extremas.

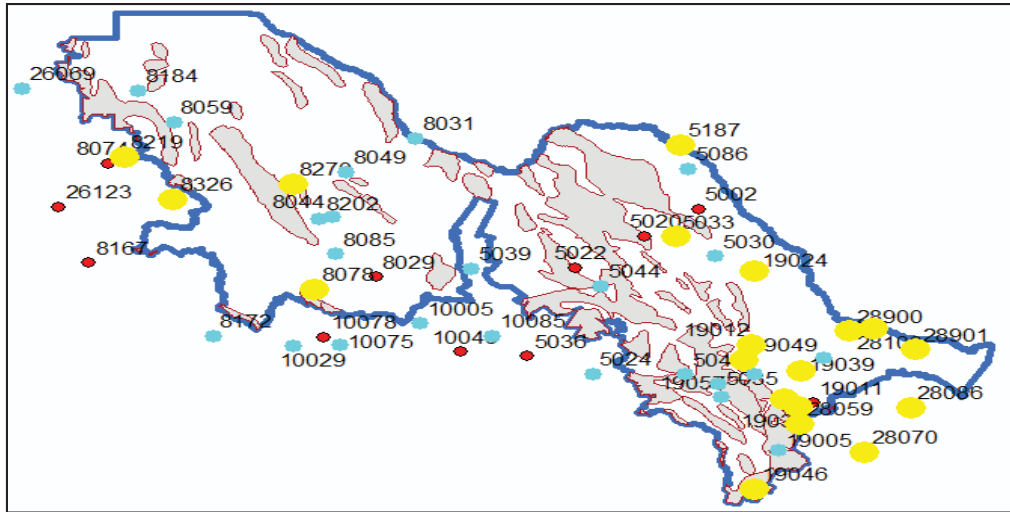


Figura84 Recurrencia de meses con sequía según SPI de 3 meses para el periodo (1980-2012).
Fuente: Elaboración propia.

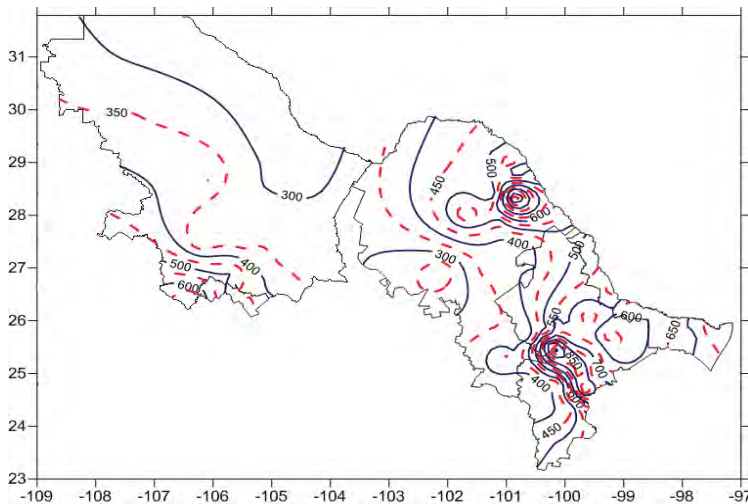


Figura85 Isoyetas medias históricas para la RHA VI.
Fuente: CONAGUA, 2010.

Para el periodo de tres meses de cálculo la recurrencia de este evento fue a lo largo de toda la región (ver *Figura84*). Como se observa las estaciones en color azul indican que se registraron más de 50 meses con sequía de algún tipo. Asimismo los eventos más extremos de sequía se representan con los puntos en amarillo. Como se aprecia los eventos más extremos se presentaron

principalmente en la zona Este y Oeste de la región, exactamente en las faldas de las zonas serranas representadas en color gris. Esto puede deberse a que los huracanes llegan hasta las faldas de la zona serrana haciendo que la lluvia se incremente en algunas temporadas, y de esta manera el resultado del SPI se vuelve bajo en temporadas de estiaje. Esto provoca que la parte central de la región tenga una menor variación en los patrones de lluvias.

En la

Figura86 se presentan los mapas de valores mínimos históricos de SPI para diversos intervalos de cálculo encontrados en la RHA VI para el periodo 1980–2012.

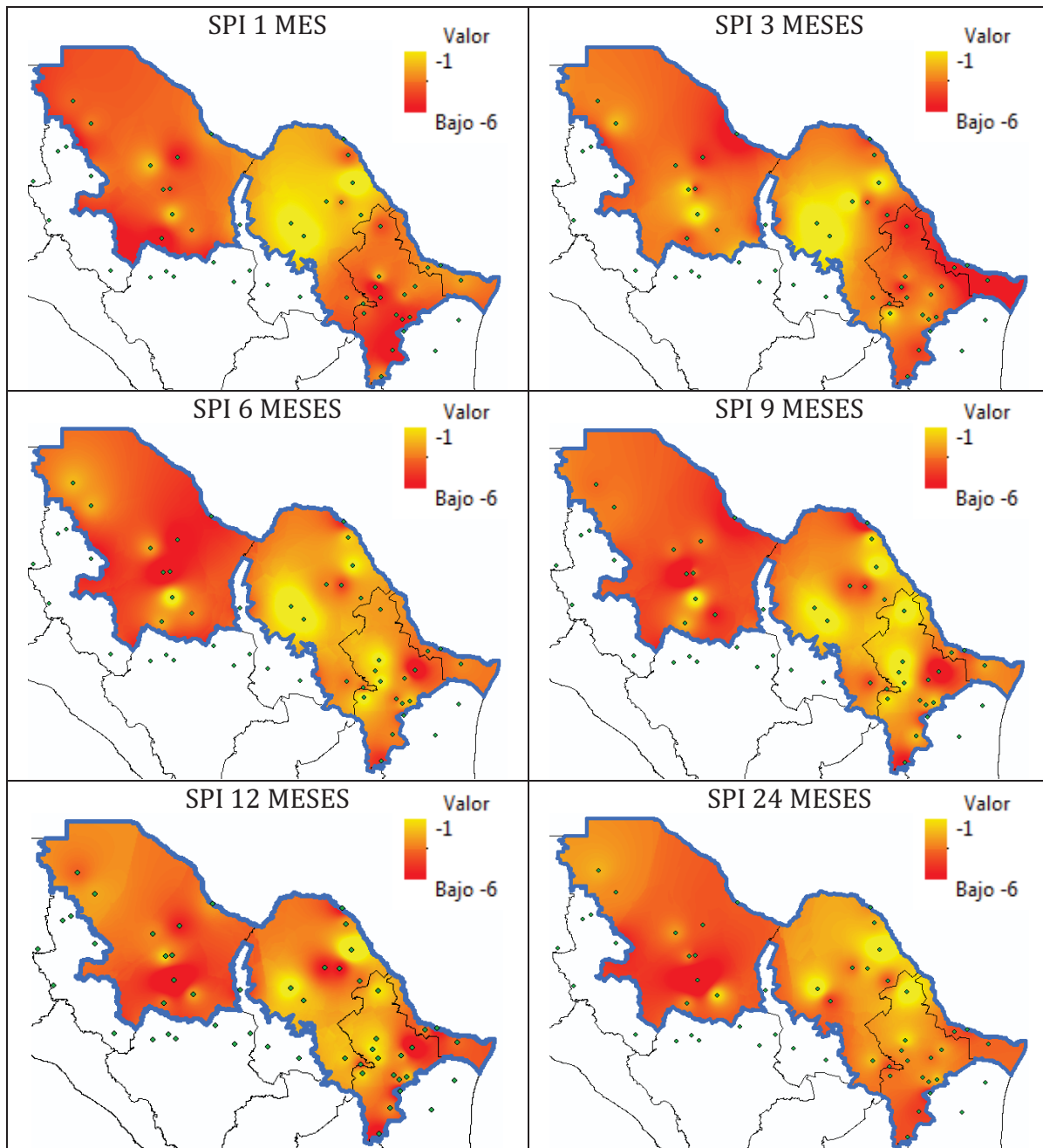


Figura86 Mapas de valores máximos históricos de sequía según SPI para el periodo (1980-2012).

Fuente: Elaboración propia.

Recordando que los valores de SPI son resultado de un análisis estadístico de una muestra, es necesario distinguir que los valores mínimos del SPI sólo indican las zonas donde la disminución normalizada de la lluvia fue mayor.

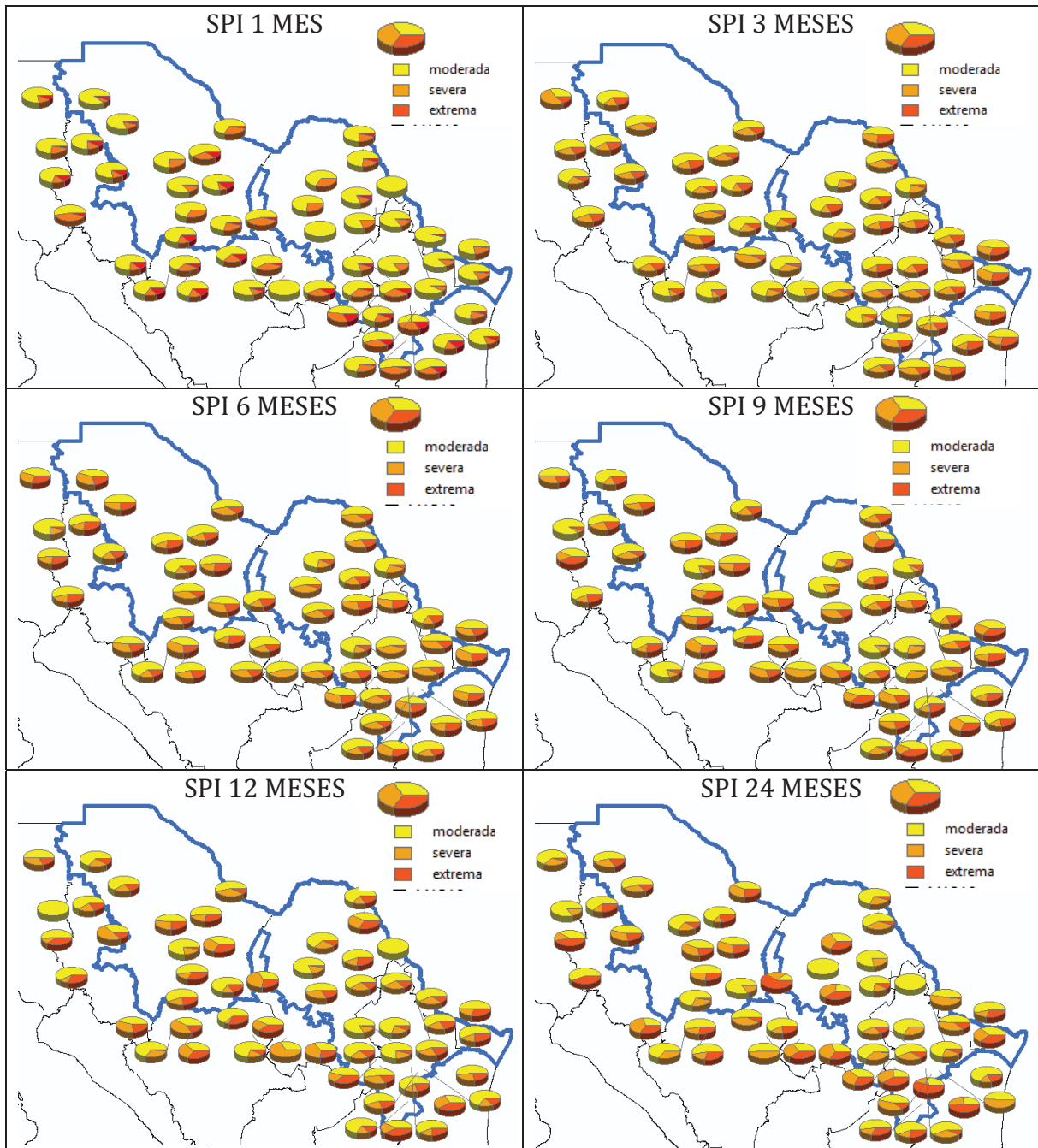


Figura87 Mapas de número de eventos y tipo de sequía según SPI para el periodo (1980-2012).
Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la

Figura86 y en la *Figura87* para los diversos periodos de cálculo del SPI los valores de sequía más extremos se presentaron en los estados de Nuevo León y Tamaulipas para periodos cortos. Para periodos de mediano y largo plazo fue la zona centro-sur de Chihuahua, Coahuila y N.L la más afectada. En cuanto al número de sequías se puede

concluir que la sequía más recurrente es de tipo moderada, y la parte con más frecuencia de sequía severa y extrema es la parte centro-sur de Coahuila, Chihuahua y Nuevo León.

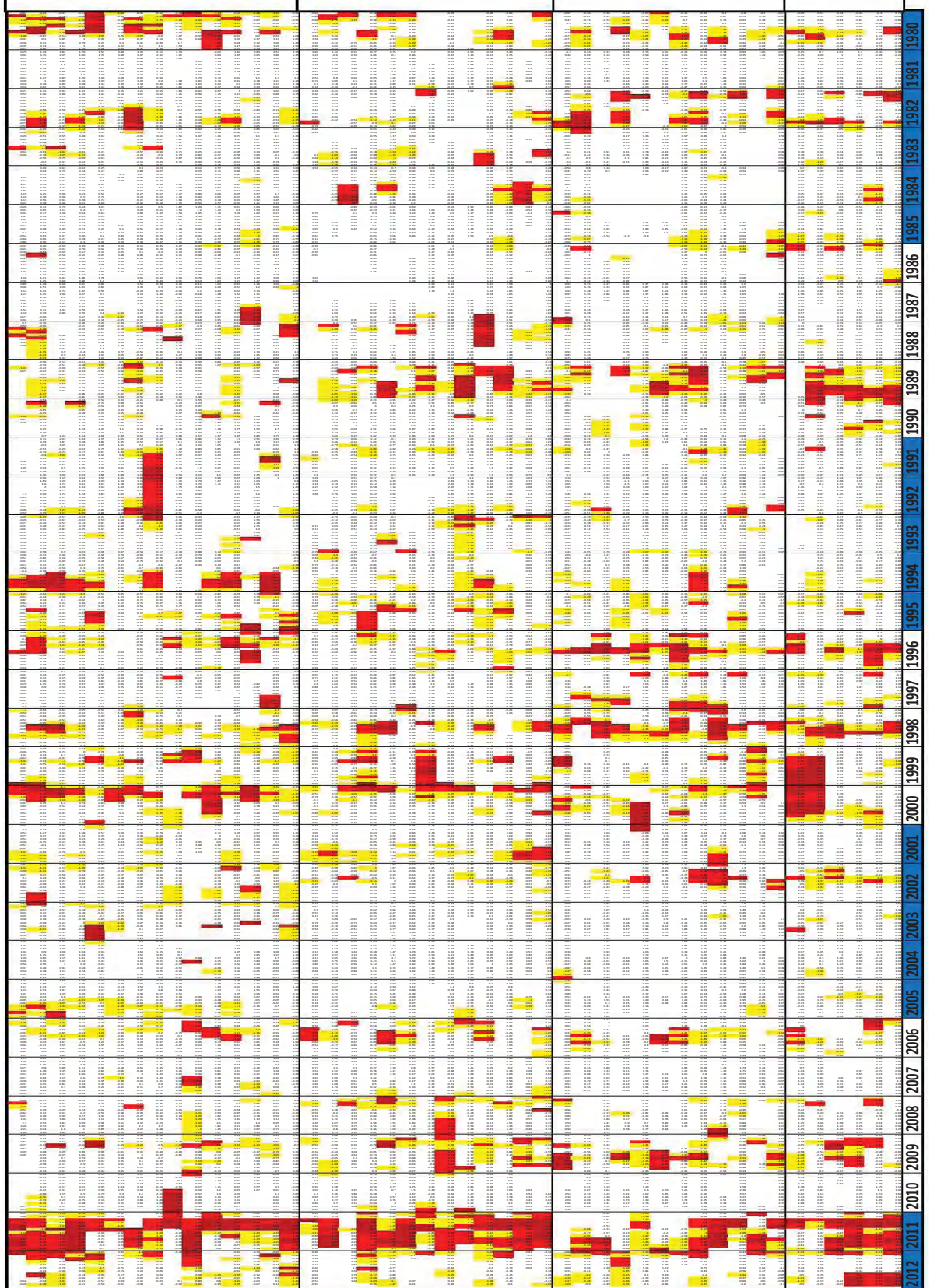


Figura88 Meses con sequía y tipo por estado según SPI 6 meses para el periodo (1980-2012).
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente en cuanto a la recurrencia con base en la Figura88, la cual se presenta a detalle junto con los cálculos para los demás intervalos de tiempo en el anexo 3, se presenta la Tabla 20 donde se muestran las principales sequías, con la intensidad y duración que se describe a continuación.

Tabla 20 Sequías históricas en la RHA VI, periodo 1980-2012.

AÑO	ZONA	INTENSIDAD	DURACIÓN
1980	Principalmente en el estado de Chihuahua, zona media de Coahuila y norte de Nuevo León.	Severa y extrema en el Noroeste de Chihuahua. Moderada en las demás regiones.	8 meses en Chihuahua y de 2 a 4 meses en las demás zonas.
1982	Norte y sur de Chihuahua y centro de Nuevo León.	Extrema en sur de Chihuahua y centro de Nuevo León. Moderada en el resto de la zona afectada.	9 meses las zonas más afectadas. De 3 a 5 meses con intermitencia en las demás zonas.
1984	Coahuila	Moderada en la mayoría del estado. Severa y extrema en el Norte del estado.	De 5 a 7 meses.
1989	En la mayor parte de los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas.	Presencia de sequía severa y extrema en la zona centro de Coahuila y centro-norte de Nuevo León.	De 9 a 11 meses en las zonas más críticas.
1991 y 1992	Zona sur-sureste de Chihuahua.	Severa y extrema.	26 meses.
1994	Sureste, Noreste y Noroeste de Chihuahua. Centro de Coahuila y N.L.	Severa y extrema en la mayor parte de la zona afectada.	De 6 a 8 meses.
1995 y 1996	Principalmente N.L. y Tamaulipas. Partes de Chihuahua y Coahuila.	Severa y extrema en N.L. y Tamaulipas. Moderada principalmente en Chihuahua y Coahuila con algunos episodios severos.	De 8 a 11 meses, con intervalos intermitentes.
1998-2000	Afecto los 4 estados que integran la RHA en diferentes periodos.	Se presentaron varios episodios de sequía severa y extrema.	Se presentaron diversas duraciones y episodios con duraciones desde los 3 hasta los 33 meses intermitentes. Coincidencia en toda la RHA de mayo a septiembre de 1998 y

AÑO	ZONA	INTENSIDAD	DURACIÓN
			dic-99 a Mayo-00.
2005 y 2006	Presencia en los 4 estados que integran la RHA.	Moderada en su mayoría.	De 4 a 12 meses empezando en Chihuahua en Jul-05 y Finalizando en toda la región en Ago-06.
2008 y 2009	Estados de Coahuila, N.L. y Tamaulipas.	Moderada con episodios de severa y extrema.	6 meses en promedio, aplazándose hasta 24 meses en el suroeste de Coahuila.
2011	Abarco los 4 estados que conforman la RHA.	Severa y extrema en su mayoría.	De 12 meses en la mayoría de la región hasta los 22 meses en el estado de Chihuahua.

Fuente: Elaboración propia con información del SMN.

Como se observa en la tabla anterior la sequía de 2011 fue extraordinaria. No se comparó a ningún otro episodio de sequía. Sólo se equipara el periodo de 1998 a 2000 pero sin igualarlo. En general se observan que los episodios de sequía severa y extrema que abarcaron toda la RHA fueron 1980-1982, 1989, 1998-2000 y 2011, concluyendo que cada 7 a 11 años se presentan episodios de sequía intensos, largos y muy extensos.

Comparando los años de sequías severas y extremas con los años en que se presentó el fenómeno de El Niño y con el número de manchas solares por año se obtiene lo siguiente.

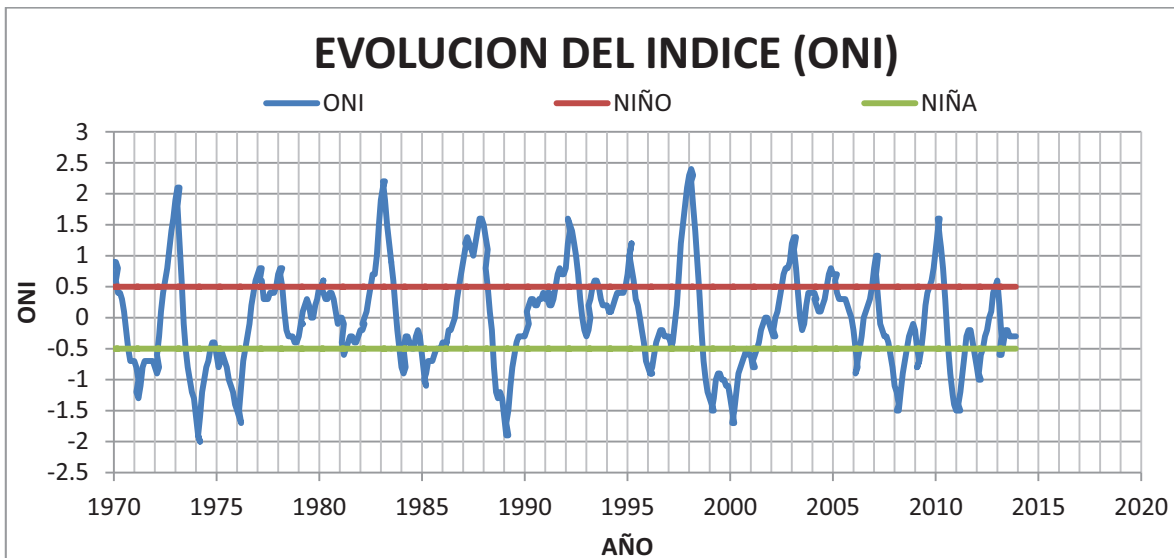


Figura89 Años con presencia del fenómeno del Niño y Niña.

Fuente: Elaboración propia con datos de (NOAA, 2013)

El Índice del Niño Oceánico (ONI) se ha convertido en el factor estándar que la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), agencia de investigación del Departamento de Comercio de los Estados Unidos, usa para identificar los eventos de El Niño y La Niña en el pacífico tropical (ver *Figura89*). El ONI es el promedio de tres meses de anomalías en la temperatura del océano que el equipo de científicos de la NOAA calcula para la región ubicada ente los paralelos 5° N y 5° S y los meridianos 120° a 170° O. De acuerdo a este índice existe Niño cuando por más de 5 meses consecutivos las anomalías de temperatura del océano se encuentran por encima de 0.5°, cuando las anomalías se encuentran por debajo de -0.5° se dice que existe Niña que es la fase fría del ENSO.

A continuación en la *Figura90* se presenta los años con mayor área de manchas solares.

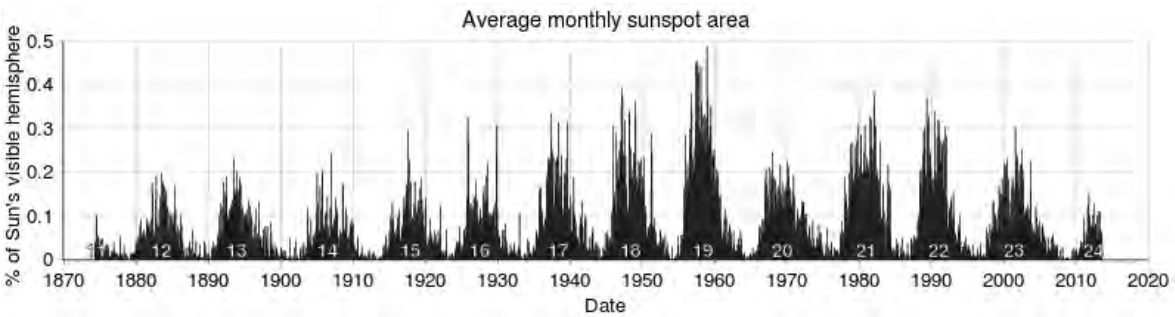


Figura90 Variación del promedio mensual del total de área de manchas solares históricas.
Fuente: (Royal Observatory of Belgium, 2013)

Como se puede concluir las sequías meteorológicas más severas, largas y extendidas coinciden con los años donde el área de las manchas solares va de mínima a máxima.

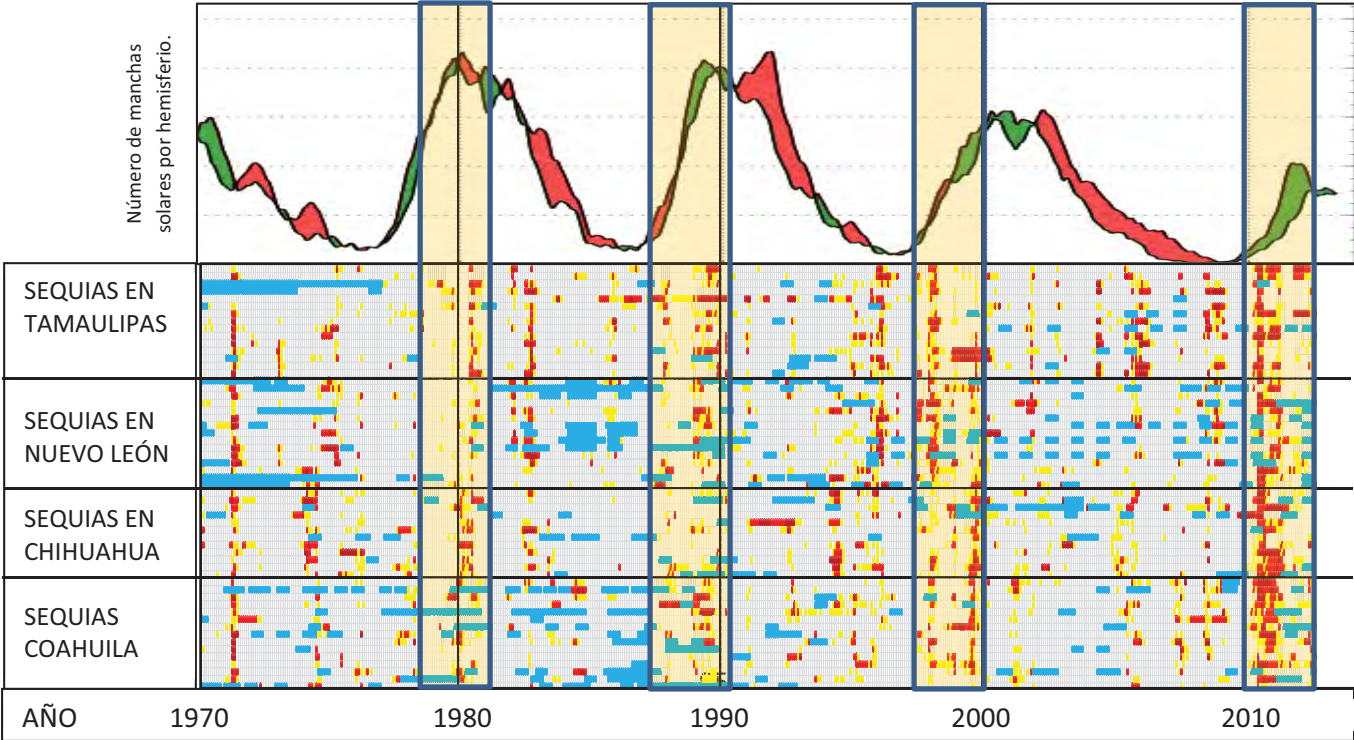


Figura91 Comparación de años de sequía según el SPI₆ con los años con manchas solares.

Fuente: Elaboración propia

En la *Figura91* la zona de color verde sobre la gráfica indica mayor número de manchas solares en el hemisferio norte del sol y las zonas rojas indican mayor número de manchas en el hemisferio sur. En la parte inferior de dicha figura se presentan los resultados del SPI₆ en miniatura para las estaciones en la RHA VI reconociendo los estados a donde pertenecen y los años de ocurrencia; las celdas pintadas de amarillo corresponden a sequías moderadas, las de color rojo a sequías severas, las de color café a sequías extraordinarias y las de color azul a meses donde por ausencia de datos no se pudo calcular el valor del SPI. Se observa que los periodos de sequía intensos, largos y extensos tienen una buena correlación con los periodos en que el número de manchas solares es mínimo y se incrementó a su máximo. Existen otros periodos de sequía que no coinciden con la correlación mencionada, sin embargo no son periodos tan extensos ni largos, encontrando más periodos de sequías aislados en la zona de Nuevo León y Tamaulipas, sin embargo se recuerda que son zonas con una precipitación muy variable por motivo de ser zonas donde frecuentan los huracanes, haciendo que de acuerdo al SPI se pueda considerar en estas zonas los periodos de estiaje como sequías.

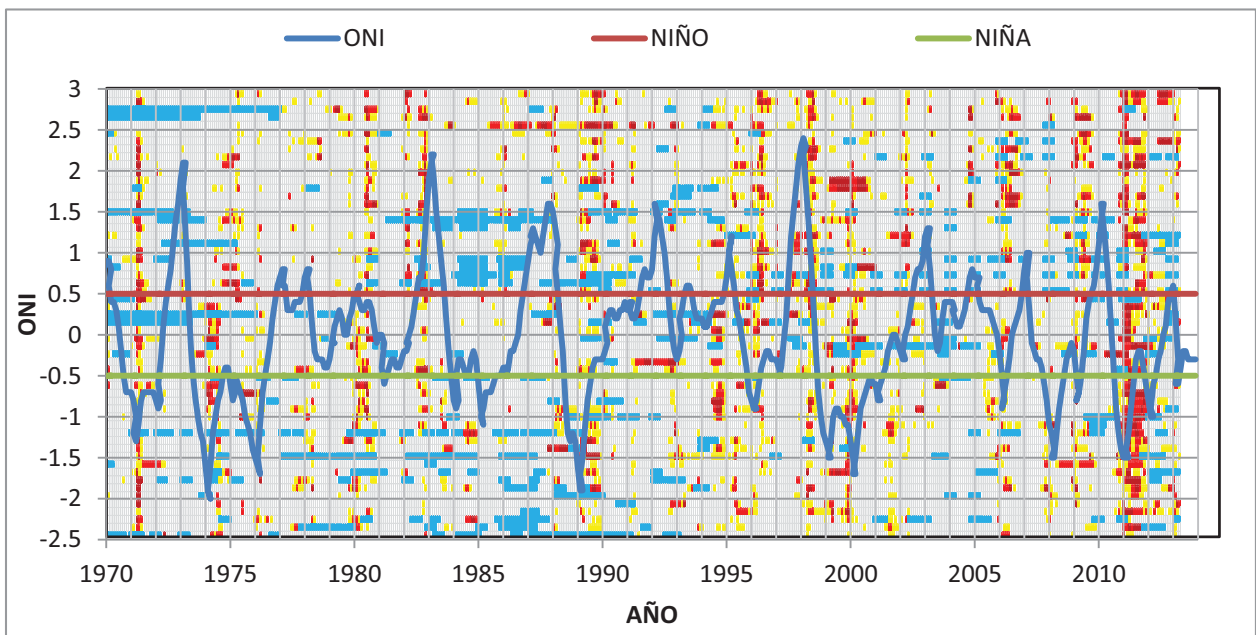


Figura92 Comparación de años con sequía según el SPI₆ con los años con índice ONI.

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la comparación con la presencia de El Niño y la Niña se observa que para el mismo periodo de 1970-2013 no existe una correlación tan alta de los periodos de sequía como con la actividad solar, lo que se puede concluir de la *Figura92*. En dicha figura se aprecia que la mayoría de las sequías en los estados de la RHA VI han ocurrido durante la transición de El Niño a La Niña, recordando que los valores de las celdas están corridos seis meses por motivo de que el SPI₆ empieza a calcular al sexto mes como se explicó en el apartado 5.1 pagina 86. Sin embargo no es tan marcada dicha correlación. Nuevamente en la *Figura92* aparecen los eventos de sequía ligera en color amarillo, en rojo los de sequía severa, en café los de sequía extrema y en azul los datos faltantes.

Por lo que del análisis anterior se considera importante monitorear el estado de la actividad solar y de igual manera el estado del Índice ONI.

5.2 ÍNDICE DE SEQUÍA EN CORRIENTES (SDI).

Para definir la sequía en función de los caudales de ríos, Nalbantis (2008) y Nalbantis y Tsakiris (2009) desarrollaron un índice similar al SPI, denominado Streamflow Drought Index (SDI). Por lo general, el escurrimiento sigue una probabilidad de distribución sesgada, la cual puede aproximarse a la familia de las funciones de las distribuciones gamma. La distribución es entonces normalizada. (Arreguín, López, Velásquez, & López, 2013)El índice SDI se define como:

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

Ecuación 9

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

La clasificación del SDI identifica a los valores de la sequía hidrológica de acuerdo a la Tabla 21.

Tabla 21 Definición de los estados de sequía hidrológica mediante el SDI.

ESTADO	DESCRIPCIÓN	CRITERIO	PROBABILIDAD (%)
0	SIN SEQUÍA	SDI>0	50.5
1	SEQUÍA SUAVE	-1.0 <= SDI < 0	34.1
2	SEQUÍA MODERADA	-1.5 <= SDI < -1.0	9.2
3	SEQUÍA SEVERA	-2.0 <= SDI < -1.5	4.4
4	SEQUÍA EXTREMA	SDI < 2.0	2.3

Fuente: (Arreguín et al.,2013).

Para la obtención del índice se obtuvieron cuatro series temporales, la serie K1 corresponde a la sumatoria de los escurrimientos de los tres primeros meses del año hidrológico Oct - Dic, K2 a la sumatoria de los primeros 6 meses Oct - Mar, K3 a la sumatoria de los meses Oct - Jun y finalmente K4 a la sumatoria de los doce meses, octubre-septiembre.

El SDI se implementó en algunas de las principales presas donde existen registros de volúmenes de entradas al vaso, para este caso se utilizó en las principales presas de la RHA VI Río Bravo (ver *Figura93*).



Figura93 Presas de análisis dentro de la RHA VI río Bravo.
Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA.

Para esto se contó con la información de 19 presas en la zona siendo estas enunciadas a continuación:

- | | | | |
|--------------------|-----------------|-------------------|------------------|
| 1. Salinillas | 2. Las blancas | 3. La boquilla | 4. P. Del águila |
| 5. La boca | 6. La fragua | 7. Fco. I. Madero | 8. San Gabriel |
| 9. El cuchillo | 10. Centenario | 11. Luis I. León | 12. La amistad |
| 13. Cerro prieto | 14. San miguel | 15. Chihuahua | 16. Falcón |
| 17. Marte R. Gómez | 18. V. Carranza | 19. El rejón | |

Una vez observada la ubicación de las presas en la cuenca se revisó la disponibilidad de los datos de escurrimiento de las mismas, observando que las presas Salinillas, Las Blancas, Chihuahua y el Rejón no contaban con datos para este análisis por lo que se

descartaron. El análisis de la obtención del SDI se llevó a cabo con las presas que se muestran en la *Figura94* donde se muestran las cuencas que aforan dichos almacenamientos.

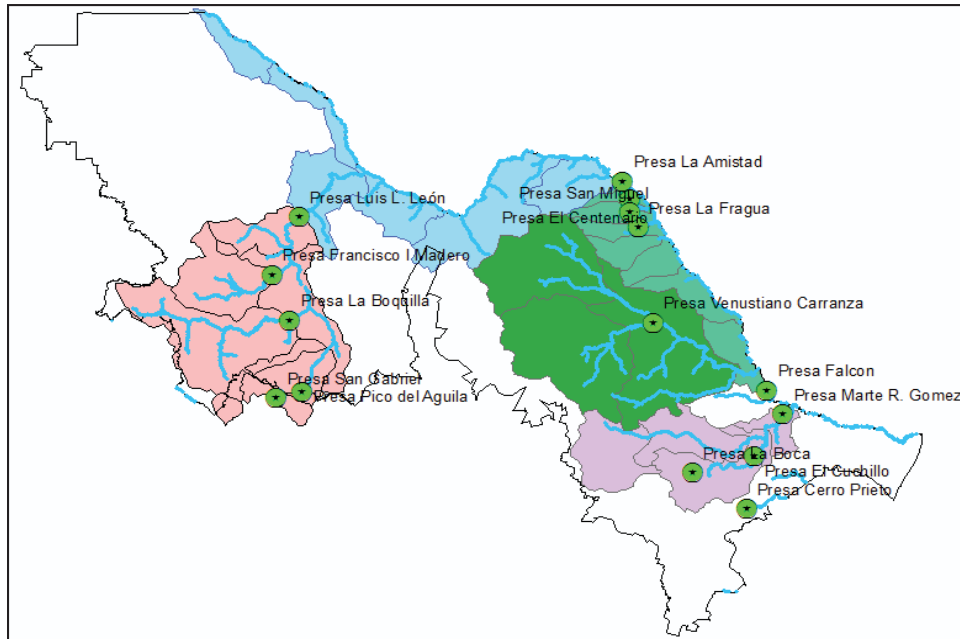


Figura94 Cuencas de las presas con información 1980-2013 en la RHA VI río Bravo.
Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA.

Los resultados de aplicar la metodología del SDI a los valores de escurrimiento registrados en las principales presas se muestra a continuación.

Se aplicaron los cálculos del SDI para los 4 periodos mencionados arriba, $k=1,2,3,4$, obteniendo que el valor del cálculo del K1 (Oct-Dic) no corresponde en su totalidad con el K2 (Oct-Mar), K3 (Oct-Jun) y el K4 (Oct-Sep). Se obtuvieron los gráficos del comportamiento del SDI los cuales se muestran en su totalidad en el Anexo 4.

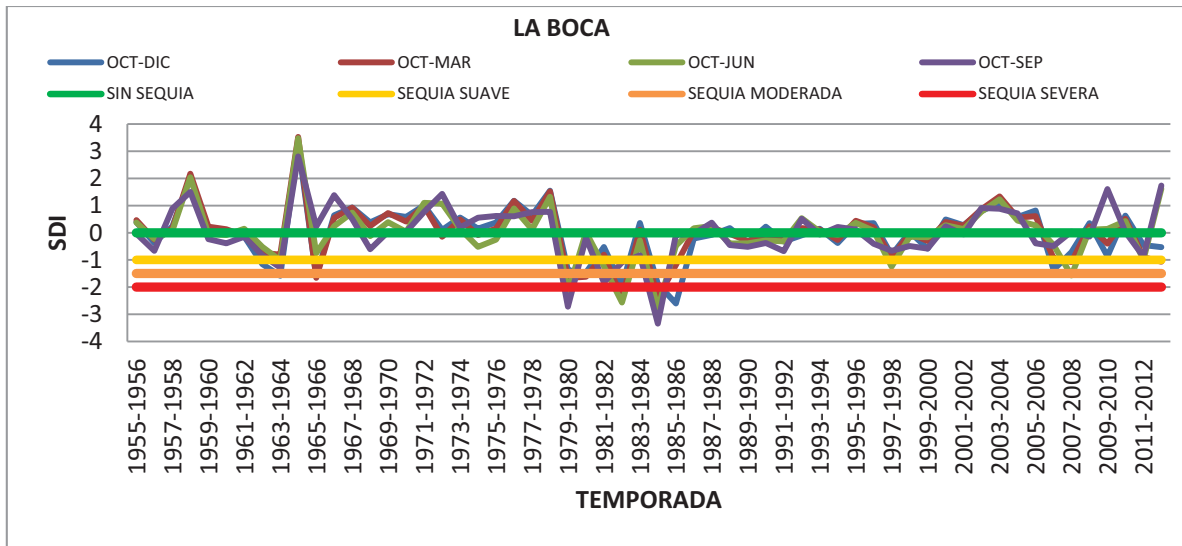
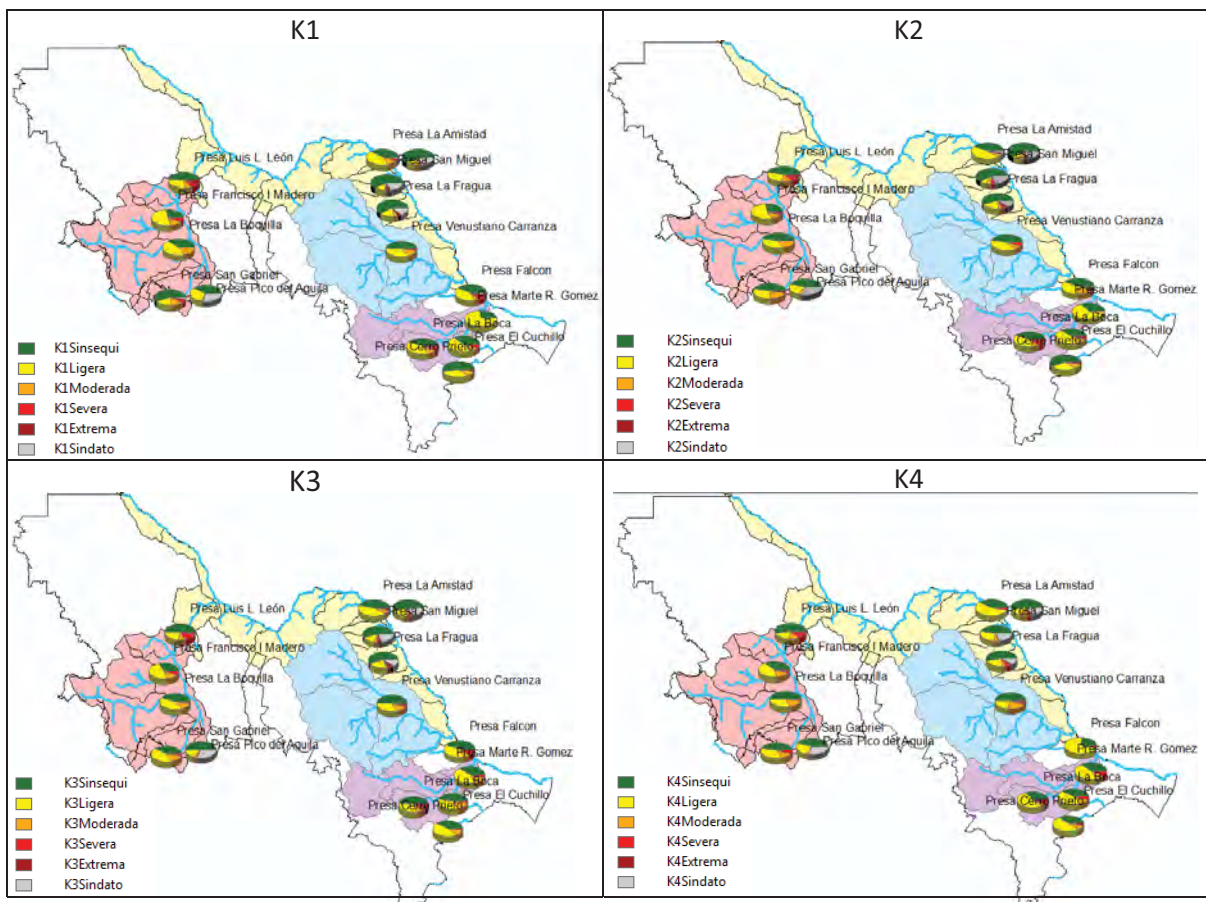


Figura95 Gráfico de comportamiento del SDI histórico para la presa La Boca periodo 1980-2012.
Fuente: Elaboración propia con información de (CONAGUA, 2013)

Una vez obtenido los datos del valor del SPI se procedió a revisar el comportamiento de la sequía hidrológica en la región. Dichos análisis se presentan en la *Figura96* y *Figura97*, donde posteriormente se explican los resultados obtenidos.



--	--

Figura96 Recurrencia de años con sequía en presas de acuerdo al SDI 1980-2012.

Fuente: Elaboración propia con información de (CONAGUA, 2013)

En cuanto a la recurrencia se observa que las presas del río Conchos padecen de sequía más de la mitad de los años de cálculo para los 4 periodos analizados, la presa Pico del Águila que se encuentra en la parte alta en la zona serrana al sur de Chihuahua no dispone de todos los años con registros.

La presa Luis L. León presenta un gran número de años con sequía severa y extrema, presentando un comportamiento muy semejante con la presa Fco. I. Madero, lo cual muestra que dicha presa tiene mayor influencia sobre los escurrimientos que se generan en la presa Luis L. León.

La presa de La Amistad presenta varios episodios de Sequía, en su mayoría ligera, teniendo un comportamiento muy semejante al de las presas del río Conchos. Las presas al Noreste de Coahuila padecen menos de sequías que las del sistema Conchos, pues de los años con registros aproximadamente una cuarta parte de ellos presentaron sequía.

La presa Venustiano Carranza sobre el río Salado presenta en más de la mitad del periodo 1980-2012 años con sequías observando que se incrementa su intensidad al utilizar los registros del periodo Oct/Sep lo que indica escurrimientos por debajo de la media en varias ocasiones en el periodo húmedo.

La presa Falcón presenta más registros de sequía que la presa La Amistad, lo anterior puede deberse a que también depende del estado de las presas del río Salado y del sistema Conchos. En la presa Falcón se observa un aumento de los periodos de sequía extrema en los periodos K1, K2 y K3 recuperándose con los escurrimientos de Ago-Sep lo cual indica que es una presa que depende de los escurrimientos de este periodo.

Finalmente las presas del río San Juan presentan para el periodo analizado más de la mitad de los años con sequía observando que para los periodos K1 y K4 presentan un comportamiento semejante al igual que los periodos K2 y K3 lo que nos indica que son presas que tienen una variación grande en los escurrimientos generados en los periodos lluviosos probablemente por la zona en que se encuentran donde los escurrimientos más fuertes son en la temporada de huracanes, siendo el caso completamente diferente de las presas del sistema Conchos donde para todos los periodos analizados el comportamiento fue similar indicando un régimen de escurrimientos más constante.

En cuanto a los valores mínimos históricos *Figura97* se observa que las presas de la parte Este de la RHA VI son las que presentan episodios más graves de sequía cuando se consideran los meses de Abril a Septiembre. Las presas internacionales ambas cuentan con episodio de sequía extrema. Para las presas del sistema Conchos la sequía más grave apareció en un periodo de Abril a Junio época en la que existe un estiaje. Los escurrimientos sobre el río Salado muestra que el valor mínimo se originó en temporadas donde se consideró los escurrimientos del periodo Abril a Septiembre como en el caso de las del río San Juan.

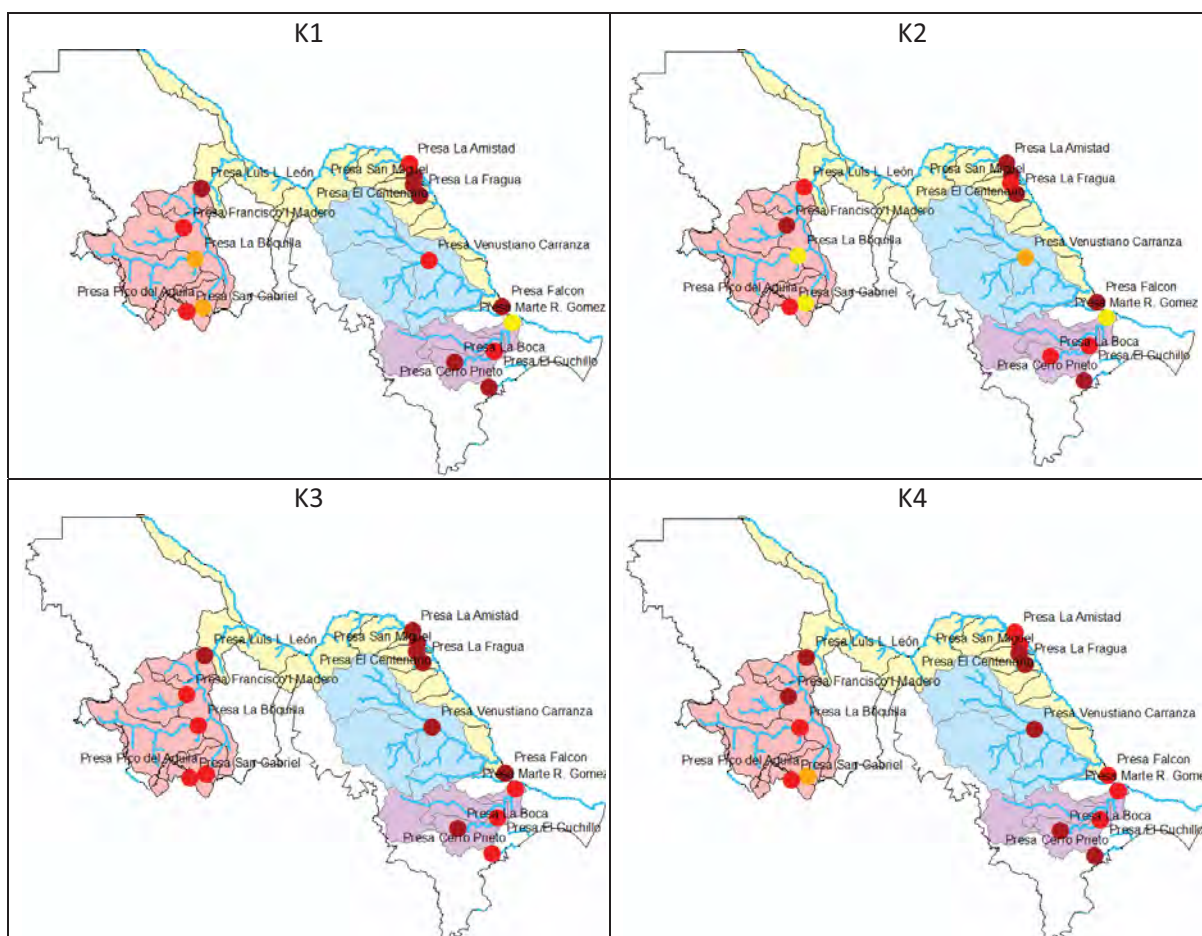


Figura97 Valor mínimo de sequía en presas de acuerdo al SDI 1980-2012.

Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA.

Por lo anterior el beneficio de cada uno de los periodos de análisis del SDI se presenta en la Tabla 22.

Tabla 22 Definición de los estados de sequía hidrológica mediante el SDI.

PERIODO	MESES	UTILIDAD
K1	OCT-DIC	Verificar como cierra el ciclo de temporadas de lluvias.
K2	OCT-MAR	Situación del recurso hídrico incluyendo la temporada de lluvias producto de los frentes fríos que se registran en la zona.
K3	OCT-JUN	Estado de la situación del recurso hídrico durante la temporada de estiaje.
K4	OCT-SEP	Estado del recurso hídrico donde se incluye la temporada de lluvias.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación con base en los resultados del SDI mostrado en el anexo 4, se presentan la Tabla 23 donde se aprecian los siguientes episodios de sequía hidrológica en las principales presas de la región.

Tabla 23 Valores de SDI Octubre - Septiembre para el periodo 1979-2012.

PERIODO	LA BOCA	EL CUCHILLO	CERRO PRIETO	MARTE R. GÓMEZ	LA FRAGUA	CENTENARIO	SAN MIGUEL	V. CARRANZA	LA BOQUILLA	FCO. I. MADERO	LUIS L. LEÓN	P. DEL ÁGUILA	SAN GABRIEL	LA AMISTAD	FALCÓN
1979-1980	-2.7	-1.7	-1.4	-1.7				0.2	0.1	0.4	0.3		-0.9	0.0	-0.1
1980-1981	-0.2	0.4	0.3	0.5				1.2	0.6	1.4	0.7		0.7	0.2	0.6
1981-1982	-1.8	-1.0	-0.3	-1.1				0.0	-0.1	-1.3	0.6		0.4	0.2	-0.2
1982-1983	-1.1	0.3	-0.3	0.0				-1.2	-0.1	-0.4	-0.1		-1.2	-0.4	-0.5
1983-1984	-0.8	0.1	-0.1	-0.3	-1.1			-1.4	0.8	0.8	0.5		0.7	0.0	-0.5
1984-1985	-3.3	-0.6	-0.6	-0.8	-0.5			-1.2	-0.2	-0.7	0.3		-0.2	-0.1	-0.2
1985-1986	-0.1	-0.1	0.0	0.1	0.3			0.3	0.9	1.3	0.4		1.4	0.2	0.0
1986-1987	0.0	0.1	-0.1	0.0	1.3			1.0	0.0	0.0	0.5		0.8	0.4	0.3
1987-1988	0.4	0.7	0.8	0.7	0.7	-1.4	0.4	0.5	0.6	0.0	0.5		0.4	0.1	0.0
1988-1989	-0.5	-0.2	-0.4	-0.2	0.3	-1.4	-0.2	0.2	0.5	-0.2	0.5		-1.7	-0.1	-0.1
1989-1990	-0.5	-1.0	-1.2	-1.0	0.5	1.7	2.0	-0.3	0.3	0.9	0.6		0.9	0.3	-0.2
1990-1991	-0.4	-0.6	-0.2	-0.7	0.6	1.2	0.8	0.0	1.4	1.3	1.1		1.4	0.7	-0.3
1991-1992	-0.7	-0.5	-0.4	-0.7	0.7	-0.8	-0.9	0.8	0.5	-0.7	0.3		-0.2	0.5	0.1
1992-1993	0.5	-0.2	-0.1	0.3	0.1	1.7	1.7	0.3	0.2	-0.8	0.5		0.1	0.0	-0.5
1993-1994	-0.1	-0.9	-0.6	-0.7	-0.5	0.7	-0.3	-0.2	-1.3	-2.6	0.0	-0.2	-1.8	-0.2	-0.6
1994-1995	0.2	-0.2	0.9	-0.3	-1.8	0.3	0.9	-1.1	-1.5	-0.5	-1.1	-1.2	-1.3	-0.4	-0.7
1995-1996	0.1	-1.0	-0.4	-1.0	-2.2	0.6	0.4	-1.2	0.6	0.8	-2.6	-1.0	0.7	-0.4	-0.5
1996-1997	-0.4	-0.8	-0.7	-0.8	-1.9	1.0	1.9	-0.2	-0.5	-0.5	-1.4	0.0	-0.6	-0.3	-0.7
1997-1998	-0.7	-0.9	-0.7	-0.9	-0.3	0.0	-1.1	-0.7	-1.0	-1.6	-1.1	0.1	-1.0	-0.6	-0.4
1998-1999	-0.5	-0.9	-0.2	-0.8	0.4	0.3	0.7	0.4	-0.1	0.0	-1.5	-0.6	-0.2	-0.4	-0.2
1999-2000	-0.6	-1.5	-2.2	-1.8	-0.4	-0.1	-0.1	-0.7	-1.2	-1.3	-1.6	-0.5	-0.9	-0.5	-0.8

PERIODO	LA BOCA	EL CUCHILLO	CERRO PRIETO	MARTE R. GÓMEZ	LA FRAGUA	CENTENARIO	SAN MIGUEL	V. CARRANZA	LA BOQUILLA	FCO. I. MADERO	LUIS L. LEÓN	P. DEL ÁGUILA	SAN GABRIEL	LA AMISTAD	FALCÓN
2000-2001	0.2	0.2	0.0	-0.8	-1.2	-1.3	-0.4	-1.2	-0.5	-1.2	-1.5	-0.7	-1.1	-0.5	-0.5
2001-2002	-0.1	-0.7	-0.1	-0.2	-0.7	-0.3	-1.5	-2.3	-0.7	-0.3	-1.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6
2002-2003	0.9	1.0	0.9	-0.4	0.2	0.5	0.6	-1.6	-1.5	-0.9	-1.7	-0.9	-1.2	-0.5	0.0
2003-2004	0.9	1.1	0.7	0.1	-0.3	-1.5	-0.6	0.8	-1.0	-0.3	-0.6	-0.5	-0.4	-0.4	0.3
2004-2005	0.7	0.6	0.2	0.2	0.0	-1.7	0.2	-0.1	0.1	0.0	-1.0	-0.5	0.0	-0.3	-0.2
2005-2006	-0.4	0.2	-0.4	0.3	0.0	-1.5	-2.1	-1.5	0.7	1.1	0.2	0.7	0.9	-0.4	-0.2
2006-2007	-0.5	-0.1	0.2	-0.2	-0.1	0.5	-0.1	0.2	-0.5	-0.7	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1
2007-2008	0.0	0.8	0.3	-0.4	0.5	0.6	-0.5	1.0	1.1	1.4	1.8	2.0	1.6	0.4	-0.2
2008-2009	-0.1	-0.1	0.4	0.7	0.5	0.7	-1.1	1.1	-0.3	-0.6	0.4	0.6	0.3	0.1	0.1
2009-2010	1.6	1.8	1.8	1.6	1.8	-0.2	0.2	2.1	0.4	0.4	0.2	0.1	0.6	0.2	1.0
2010-2011	0.0	0.6	0.5	0.6	0.2	-0.4	-0.7	0.8	-1.2	-1.0	-0.3	0.4	-0.5	-0.6	0.2
2011-2012	-0.9	-1.5	-1.3	-1.6	-0.7	0.3	0.5	-1.2	-0.8	-1.3	-1.1	0.0	-0.5	-1.8	-1.7
2012-2013	1.7	3.8	2.9	4.3	2.4	0.4	-0.8	3.4	4.3	3.9	3.4	3.0	2.4	6.0	5.8

Fuente: Elaboración propia.

En la cuenca del río San Juan se aprecian periodos de sequía importante para los años 1979 a 1982, 1989 a 1990, 1999 a 2000 y 2011 a 2012. Para las del Noreste de Coahuila se aprecian episodios de sequía extrema en los periodos 1994 a 1997 y 2004 a 2006. En la cuenca del río Salado se observan sequías importantes del periodo 1982 a 1985, 1994 a 1996, 2001 a 2003, 2004 a 2006 y 2010 a 2011. En la región del sistema Conchos se observan sequías importantes en los años 1981-1984, asimismo se aprecia un largo periodo de sequía de 1993 a 2003 y en los años de 2010 a 2012. Finalmente en las presas internacionales se aprecia sequía ligera constante y una sequía muy severa en los años 2011 a 2012.

5.3 CONCLUSIONES DE COMPARACIONES ENTRE SPI Y SDI.

Como resultado de haber analizado los diferentes episodios de sequía de acuerdo a las metodologías SPI y SDI se obtuvieron las siguientes conclusiones.

1. Ambas metodologías coinciden en los periodos de sequía en general, por lo que se comprueba que existen una buena correlación entre los índices de sequía meteorológica y sequía hidrológica. Existen variaciones pero se atribuyen a los sistemas de operación de las presas.
2. Los resultados del SPI 12 y 24 tienen un mejor ajuste con los periodos de sequía según el SDI para todo el año hidrológico, por lo que se recomienda el uso del SPI₁₂ y SPI₂₄ como indicador de sequía hidrológica en los casos donde no se disponga de estaciones hidrométricas.

3. La diferencia del SPI₁₂ con el SPI₂₄ es que la sequía con el SPI₂₄ en general aparece en un promedio de 6 meses después, es decir el SPI₁₂ la detecta 6 meses antes de que el SPI la detecte como sequía por lo que monitorear el SPI de 12 meses sería una buena herramienta para conocer el desarrollo de sequías hidrológicas.
4. Para ambas metodologías los periodos de cálculo con pocos meses como es el caso del SPI₁, SPI₃ y el SDI_{K1}, SDI_{K2} muestran una muy grande variabilidad, lo que provoca que no se pueda reconocer totalmente un periodo de sequía, sin embargo son una buena herramienta para detectar los desarrollos de posibles sequías pudiendo prevenir temporadas de escurrimientos bajos.
5. Los cálculos del SPI₆ y SPI₉ mantienen una gran relación y comportamiento muy semejante entre ellos, y previenen en muy buena medida el inicio de sequías hidrológicas marcando las zonas que tienden a desarrollar sequías importantes y depurando valores de sequía que el SPI₁ y SPI₃ consideran importantes y que desaparecen en los siguientes meses inmediatos.
6. Se recomienda verificar el uso del SPI para detectar sequías que puedan provocar desastres ambientales, comparando los valores obtenidos con el índice de salud vegetativo para verificar zonas con problemas medioambientales

6. OBTENCIÓN DE ÍNDICES DE VULNERABILIDAD.

Comprender y cuantificar los peligros, evaluar la vulnerabilidad y con ellos establecer los niveles de riesgo, es sin duda el paso decisivo para establecer procedimientos y medidas eficaces de prevención para reducir los efectos de una sequía (ver *Figura98*).



Figura98 Ciclo de la prevención.
Fuente: (CENAPRED, 2006)

Acompañado del término vulnerabilidad existen un conjunto de términos relacionados que se deberá tener de manera clara para entender la relación que existe entre estos. De acuerdo al Cenapred se contemplan las siguientes definiciones.

Peligro

Probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad,

durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado. (Naturales y antropológicos).

Vulnerabilidad

Susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por el efecto de un fenómeno perturbador, es decir el grado de pérdidas esperadas.

Exposición

Se refiere a la cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio y que son factibles de ser dañados.

Riesgo

Entendido como la probabilidad de pérdida y depende de dos factores fundamentales que son peligro y vulnerabilidad.

De acuerdo a las definiciones anteriores se plasma la vulnerabilidad como una susceptibilidad de los sistemas expuestos a ser dañados o afectados. Asimismo alrededor del mundo se han planteado algunas otras definiciones mismas que se presentan a continuación.

De acuerdo al último reporte del IPCC se tienen las siguientes definiciones. (IPCC, 2012)

Exposición.

La presencia de gente, bienes, servicios y recursos medio ambientales, infraestructura o bienes económicos, sociales o culturales en zonas que pueden ser negativamente afectados.

Vulnerabilidad.

La propensión o predisposición a verse afectados.

Adaptación.

En los sistemas humanos, el proceso de adaptación al cambio climático, reales o previsibles y sus efectos, con el fin de moderar o aprovechar las oportunidades beneficiosas. En los sistemas naturales, el proceso de adaptación al clima actual y sus efectos, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima esperado.

Resiliencia.

La capacidad de un sistema y de sus partes componentes para prever, absorber, adaptarse, o recuperarse de los efectos de un evento peligroso en forma oportuna y eficiente, incluso garantizando la preservación, restauración o mejora de su estructuras y funciones básicas.

Transformación.

La alteración de los atributos fundamentales de un sistema (incluidos los sistemas de valores; normativo, legislativo o burocrática regímenes, instituciones financieras, y los sistemas tecnológicos o biológicos).

6.1 METODOLOGÍAS DE INTEGRACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Existen algunas metodologías para integrar el valor de la vulnerabilidad de una región, de acuerdo a diversos autores se presentan las siguientes.

El Centro Nacional de Prevención de Desastres publicó en el año 2006 una serie de guías metodológicas con una serie de pasos ordenados, variables, técnicas y procedimientos, que acopian, integran y siguen con el fin de evaluar, determinar, establecer y cuantificar el peligro, la vulnerabilidad y el riesgo de una región. Para el presente trabajo de investigación donde sólo se evaluará la Vulnerabilidad se revisó el libro “Evaluación de la vulnerabilidad física y social”, (CENAPRED, 2006).

En esta guía el CENAPRED plantea obtener la vulnerabilidad física. Sin embargo en dicho documento se cubre únicamente el tema de la vulnerabilidad de la vivienda ante eventos extraordinarios. Propone su obtención con base en dos niveles de información; el primero en la información del censo de población y vivienda publicado por el INEGI y el segundo por un censo en campo clasificando las viviendas por el tipo de material de su construcción. Utiliza la siguiente fórmula para obtener la vulnerabilidad física.

$$I_{vf} = \frac{V_i P_i}{V_p P_m}$$

Ecuación 10

Dónde:

I_{vf} representa el índice que mide la vulnerabilidad física de la vivienda;

V_i representa la calificación según el tipo de vivienda de acuerdo con el tipo de materiales.

V_p tipo de vivienda con el peor desempeño en relación a su vulnerabilidad;

P_i nivel de peligro por sismo o viento en la zona en estudio;

P_m nivel de peligro máximo por sismo o viento.

Como se observa para la obtención de este índice se hace parte de la Vulnerabilidad el peligro ante un evento determinado, en este caso el de sismo o viento.



Figura99 Integración de la vulnerabilidad.
Fuente: (IPCC, 2007)

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, propone evaluar la Vulnerabilidad haciendo uso de los factores mostrados en la *Figura101*. (IPCC, 2007).

Grado de Exposición. Representa la magnitud y escala de la variación de clima a la cual se está expuesto. Se identifica mediante una caracterización de una zona ante un determinado evento, en este caso sequías.

Sensibilidad. Esta componente evalúa el grado de susceptibilidad ante un determinado evento.

Capacidad de adaptación. Se refiere al potencial de adaptarse a las alteraciones que provoca el cambio climático una vez considerados las fuentes de abastecimiento y el acceso de los municipios a servicios esenciales.

El programa cofundado por la Unión Europea a través del Programa de Cooperación Transnacional del Sureste de Europa, publicó un documento en el que obtiene la vulnerabilidad a la sequía para Grecia mediante los siguientes componentes. (Karavitis, 2013).

1. SPI_6 y SPI_{12} para representar la sequía que afecta los usos de agricultura y no agricultura.
2. La capacidad de abastecimiento y la cobertura de demanda.
3. Descripción de pérdidas debido a déficits de demanda y abastecimiento.
4. Nivel de deficiencia en la infraestructura.

Para dicho trabajo se utilizaron las relaciones de la *Figura100*.

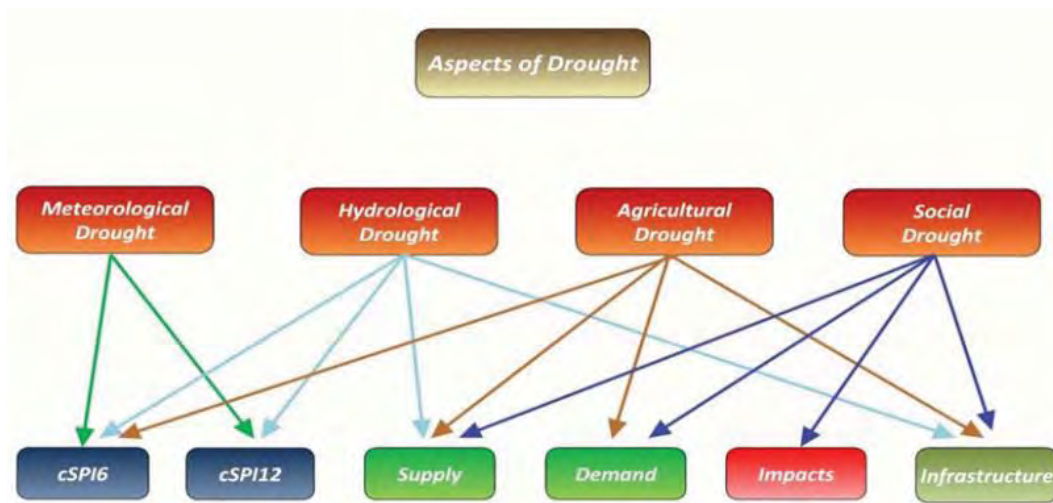


Figura100 Relación entre componentes del índice de vulnerabilidad a la sequía y aspectos de sequía.
Fuente: (Karavitis, 2013)

Otra metodología propuesta en el estudio de “Valoración de la Vulnerabilidad a la Sequía” elaborado por el Instituto Nacional de Hidrología de la India propone hacer uso de los siguientes elementos para generar la vulnerabilidad. (Kumar, 2009).

1. Imágenes de satélites de IRS, NOAAe INSAT.
2. Datos de precipitación a largo plazo.
3. Datos de escurrimientos.
4. Niveles de acuíferos.
5. Estadísticas y datos geográficos de áreas de producción de granos.
6. Población humana y de ganado y otras actividades de demanda.

Las dos últimas metodologías estandarizan los valores de cada uno de los elementos que utilizan para integrar la vulnerabilidad y finalmente obtienen un factor entre 0 y 1, para finalmente clasificar la vulnerabilidad de los valores obtenidos.

6.2 AGRUPACIÓN DE ELEMENTOS PARA OBTENCIÓN DE VULNERABILIDADES.

Habiendo estudiado las diversas metodologías existentes para la evaluación de la vulnerabilidad, se definió tomar como base la metodología generada por el IPCC.

Sin embargo con el fin de evaluar la vulnerabilidad ambiental, económica, social y una global de la RHA VI se procedió a definir los elementos que se considerarán para integrar cada una de las vulnerabilidades.

Con base en la caracterización de la sequía de la región y en las estadísticas disponibles de la misma, se decidió hacer uso de los siguientes elementos para la

obtención de cada una de las vulnerabilidades que se pretende obtener. (Ver *Figura101*, *Figura102*, *Figura103* y *Figura104*).

VULNERABILIDAD GLOBAL	Capacidad de adaptación	Disponibilidad de agua superficial
		Disponibilidad de agua subterránea
		Información del estado del recurso hídrico
		Existencia de presas y volumen de almacenamiento.
	Sensibilidad	Demanda de agua
		PIB a nivel municipal.
		Zonas de preservación natural.
		Disponibilidad de caudal ecológico.
	Grado de exposición.	Marginación social.
		Decremento de la precipitación.

Figura101 Integración de Índice de vulnerabilidad a la sequía Global.

Fuente: Elaboración propia.

VULNERABILIDAD AMBIENTAL	Capacidad de adaptación	Disponibilidad de agua superficial
		Disponibilidad de agua subterránea
		Información del estado del recurso hídrico
		Existencia de presas y volumen de almacenamiento.
	Sensibilidad	Zonas de preservación natural.
		Disponibilidad de caudal ecológico.
	Grado de exposición.	Decremento de la precipitación.

Figura102 Integración de Índice de vulnerabilidad a la sequía ambiental.

Fuente: Elaboración propia.

VULNERABILIDAD ECONÓMICA	Capacidad de adaptación	Disponibilidad de agua superficial
		Disponibilidad de agua subterránea
		Información del estado del recurso hídrico
		Existencia de presas y volumen de almacenamiento.
	Sensibilidad	Demanda de agua
		PIB a nivel municipal.

	Grado de exposición.	Decremento de la precipitación.
--	-----------------------------	---------------------------------

Figura103 Integración de Índice de vulnerabilidad a la sequía económica.

Fuente: Elaboración propia.

VULNERABILIDAD SOCIAL	Capacidad de adaptación	Disponibilidad de agua superficial
		Disponibilidad de agua subterránea
		Información del estado del recurso hídrico
		Existencia de presas y volumen de almacenamiento.
	Sensibilidad	Marginación social.
	Grado de exposición.	Decremento de la precipitación.

Figura104 Integración de Índice de vulnerabilidad a la sequía social.

Fuente: Elaboración propia.

Con base en las agrupaciones anteriores se obtuvo la información requerida para la integración de los índices de vulnerabilidad. A continuación se describe cada uno de los elementos que se utilizaron para generar el índice de vulnerabilidad.

Disponibilidad de agua superficial.

Para la disponibilidad del agua superficial se tomaron los valores publicados por la CONAGUA establecidos en el Diario Oficial de la Federación. Para lo anterior se manejó como unidad la cuenca hidrológica. En la *Figura105* se presentan la distribución del agua superficial en la región.

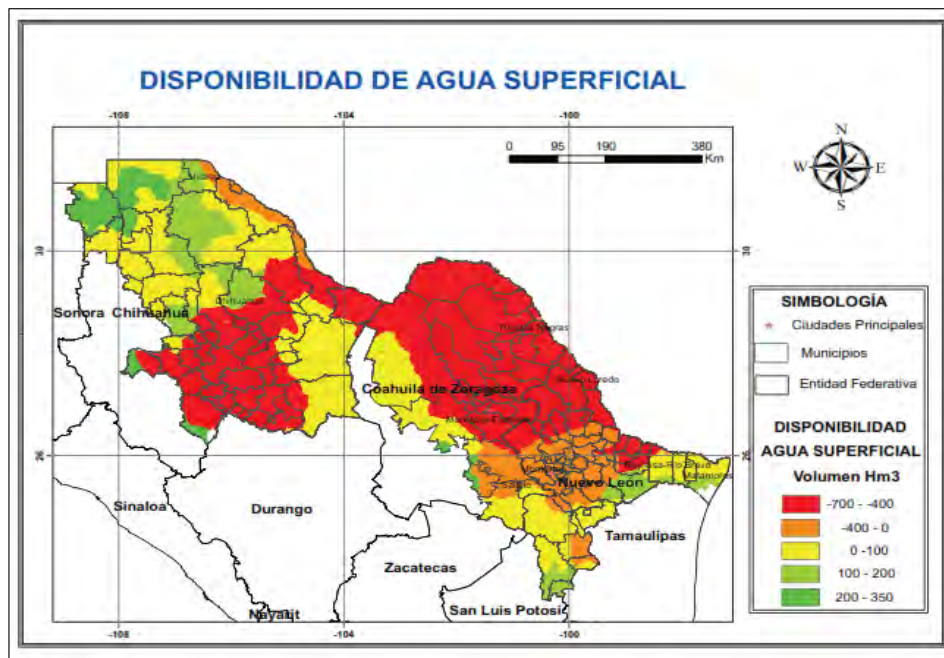


Figura105 Disponibilidad de agua superficial en la región.

Fuente: Elaboración propia con información de (CONAGUA, 2013)

Disponibilidad de agua subterránea.

Para la disponibilidad del agua subterránea se tomaron los valores publicados por la CONAGUA establecidos en el Diario Oficial de la Federación para los acuíferos existentes en la región. En la *Figura106* se presentan la distribución del agua subterránea en la región.

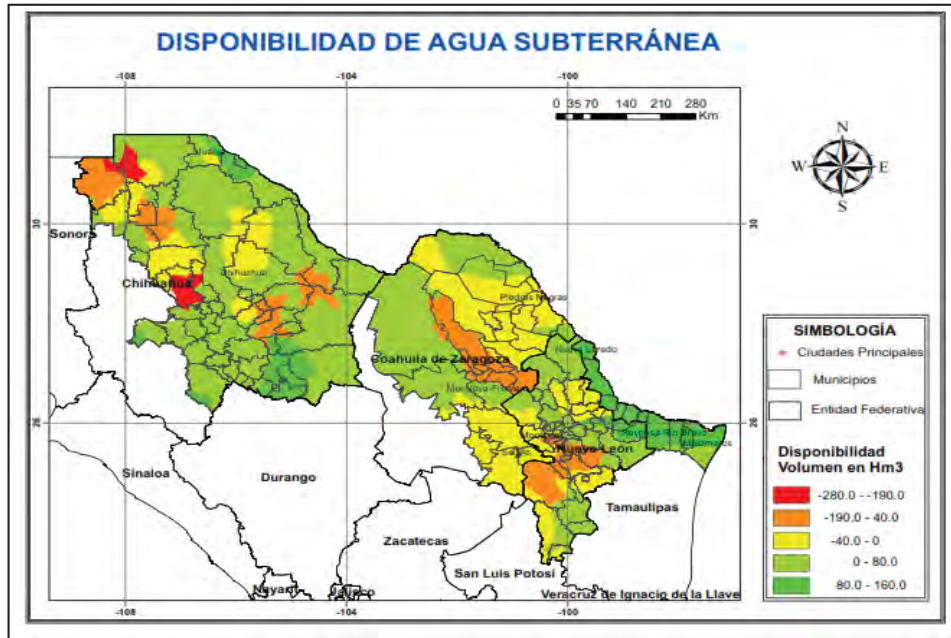


Figura106 Disponibilidad de agua subterránea en la región.
Fuente: Elaboración propia con información de (CONAGUA, 2013)

Demanda de agua.

Para la estandarización de la demanda de agua se tomaron en cuenta la base de datos del Registro Público de Derechos del Agua (ver *Figura107*), con fecha de corte de mayo de 2011. En este punto se tomaron todos los valores de agua superficial y subterránea y todos los usos inscritos. Únicamente no se tomó en cuenta el uso para generación de hidroelectricidad, esto con motivo de no ser un uso consuntivo.

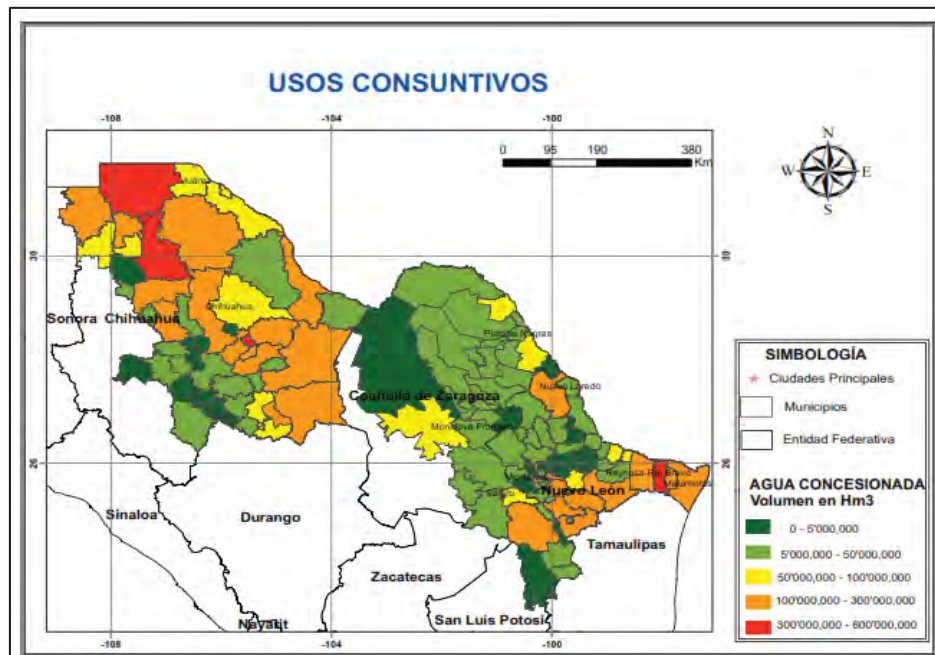


Figura107 Agua con uso consuntivo en la región.
Fuente: Elaboración propia con información de (CONAGUA, 2013)

Producto Interno Bruto.

Para la estandarización del PIB se utilizó el PIB al año 2009 generado a través del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), por la Subdirección de Programación de la Comisión Nacional del Agua, el cual se comparó con el PIB al año 2005 publicado en el Sistema Nacional de Información Municipal, sistema dependiente de la Secretaría de Gobernación. Ambas metodologías confluyen en comportamientos similares, observando que la diferencia principal del año 2005 al 2009 es que los municipios más pobres se hicieron más pobres y los ricos más ricos (ver Figura108)

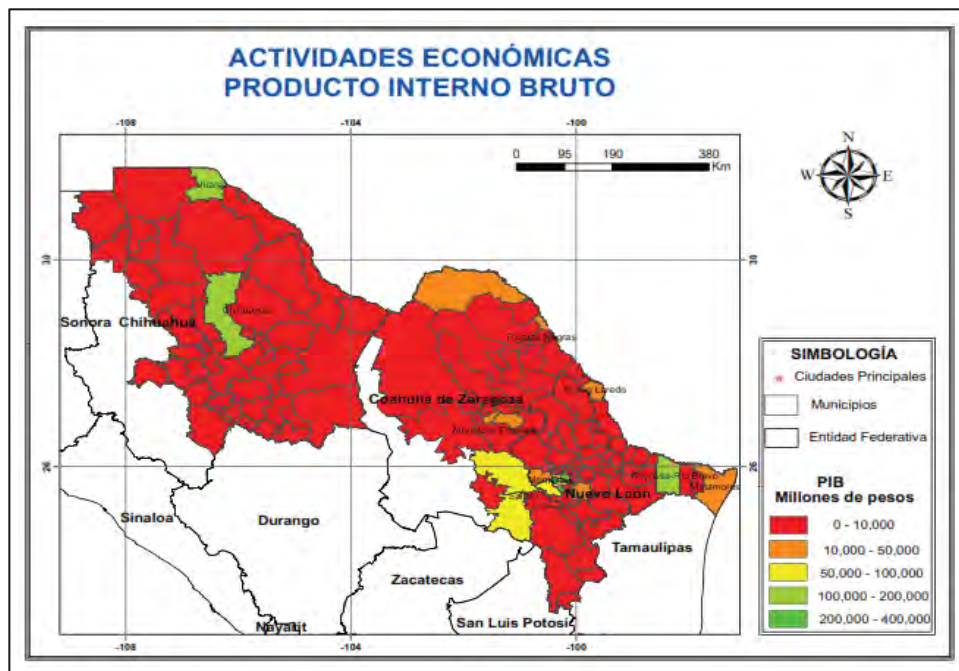


Figura108 Distribución del PIB en la RHA VI.
Fuente: Elaboración propia con información de (CONAGUA, 2013)

Zonas de preservación natural.

Para las zonas de preservación natural se tomaron en cuenta cuatro parámetros:

- 1) Existencia de bosques, selvas, vegetación hidrófila y pastizales.
- 2) Áreas Naturales Protegidas (ANP).
- 3) Sitios de Importancia Internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas (Sitios RAMSAR).
- 4) Humedales de Importancia.

La unidad que se consideró para las áreas naturales fue el área con que contaba cada municipio con alguna de las áreas especificadas.

Para el primer elemento, considerado los tipos de cobertura vegetal más sensible a la sequía, se muestran las consideradas a continuación (ver *Figura109*).

- | | |
|--------------------------|-------------------------|
| I. Bosque de coníferas. | II. Bosque de encino. |
| III. Selva Caducifolia. | IV. Selva Espinosa. |
| V. Vegetación hidrófila. | VI. Pastizal cultivado |
| VII. Pastizal gipsófilo | VIII. Pastizal halófilo |
| IX. Pastizal inducido | X. Pastizal natural |

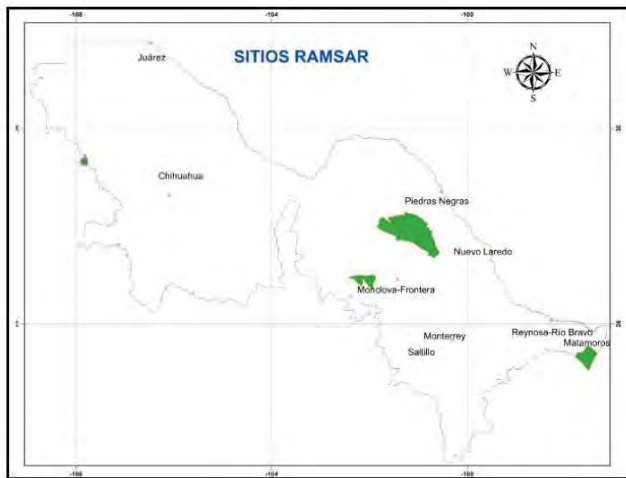
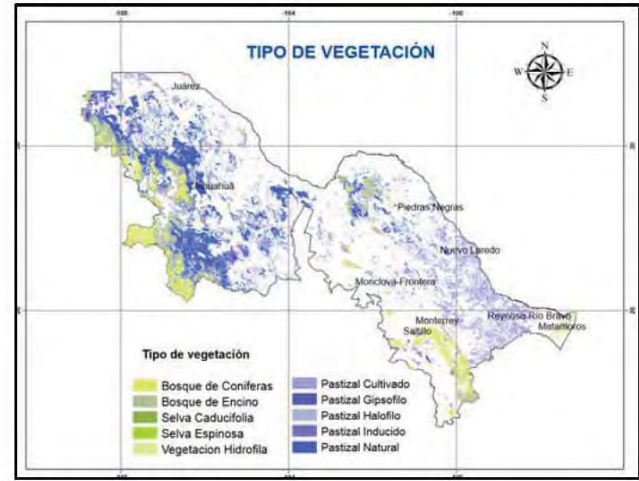
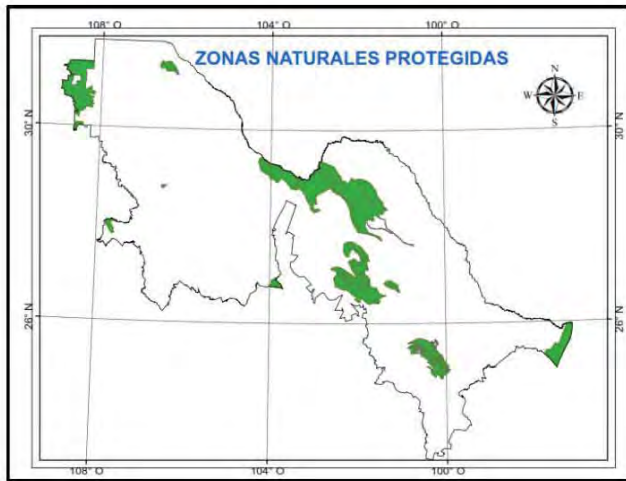


Figura109 Zonas de preservación natural en la región.
Fuente: Elaboración propia con información de (CONAGUA, 2013)

Caudal Ecológico.

Para la estandarización del caudal ecológico se utilizó la información del Caudal Ecológico por región hidrológica obtenido por la CONAGUA y publicado en la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 en la que se establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas (ver *Figura111*).

En esta norma se obtiene la importancia ecológica de las RH con base en aspectos bióticos, aspectos de integridad ecológica y alteración eco hidrológica, clasificando en Muy Alta, Alta, Media y Baja cada uno de los componentes.

La presión de uso se determina como la relación del porcentaje del volumen asignado más el concesionado entre la disponibilidad media anual por cuenca o acuífero.

Finalmente el objetivo ambiental de cada cuenca está en función de la clasificación presentada en la *Figura110*.

Estado de conservación			
A	B	C	D
MUY BUENO	BUENO	MODERADO	DEFICIENTE

Figura110 Clasificación del objetivo ambiental de las cuencas.

Fuente: (NMX, 2012)

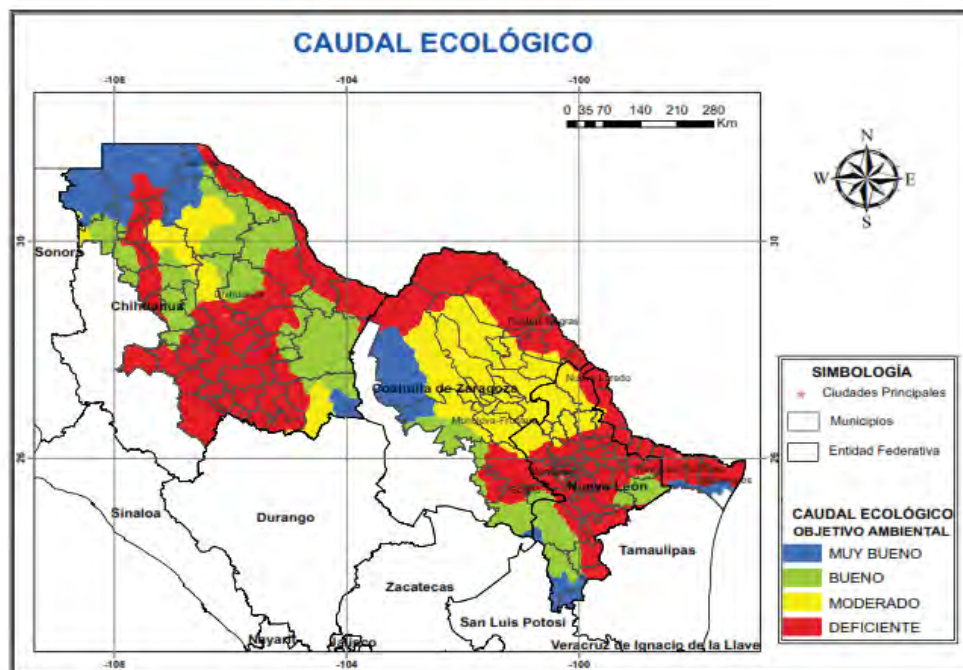


Figura111 Distribución del caudal ecológico de las cuencas.

Fuente: Elaboración propia con información de (NMX, 2012).

Información del Recurso Hídrico.

Dentro de este apartado se tomó en cuenta los dispositivos de medición con que cuenta cada uno de los municipios.

Los tipos de dispositivos considerados son los siguientes, presentados en la *Figura112*

- a) Pozos de la red piezométrica nacional.
- b) Estaciones de medición de calidad del agua.
- c) Estaciones pluviométricas.
- d) Estaciones hidrométricas.

En el caso de las estaciones pluviométricas y de la red piezométrica se tomaron en cuenta únicamente su densidad por Km², y en el caso de las pluviométricas únicamente las estaciones que se encuentran en servicio por km². Para las estaciones hidrométricas y puntos de medición de calidad del agua se consideraron la densidad de estaciones por km de red hidrográfica. Todo a nivel municipal.

Finalmente se obtuvo un promedio pesado de las estandarizaciones de cada elemento para obtener un factor global.

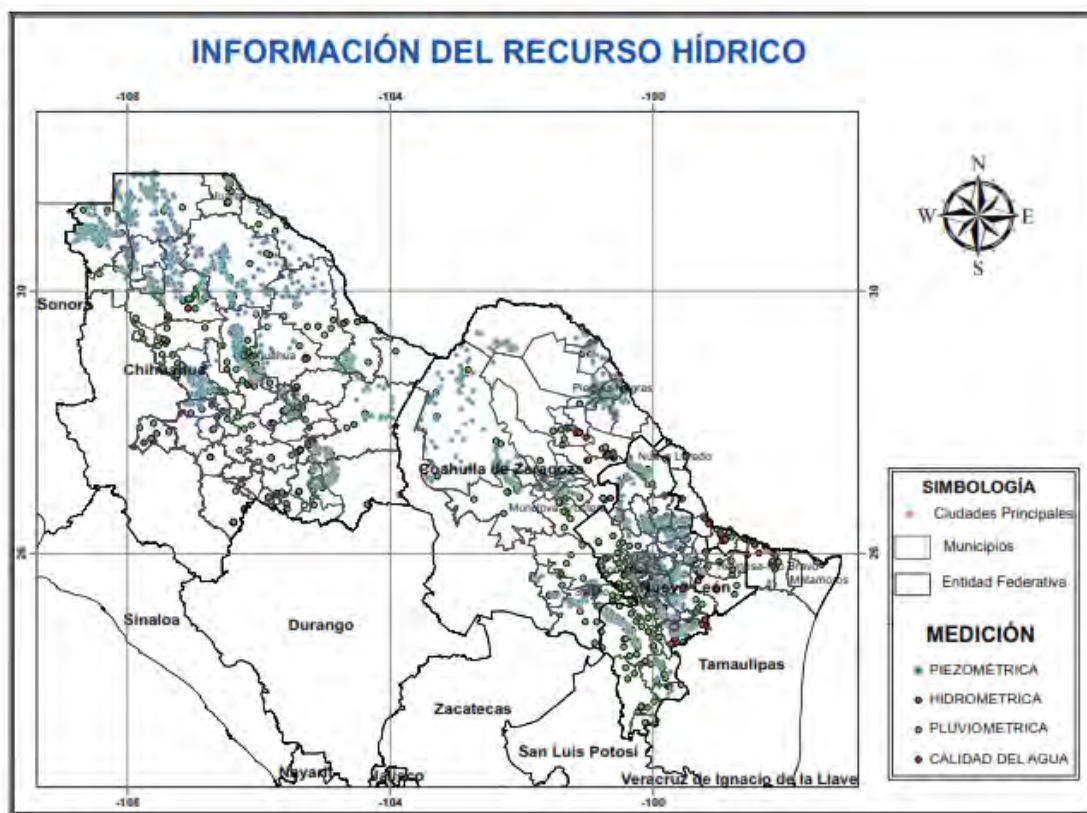


Figura112 Estaciones con información del recurso hídrico.
Fuente: Elaboración propia con información de (CONAGUA, 2013).

Decremento de la precipitación.

Es importante conocer el comportamiento del régimen de lluvias que imperan en la zona. Esto se realizó mediante la estandarización del Índice de Precipitación Estándar a seis meses, (SPI₆) por sus siglas en inglés.

Para lo anterior el procedimiento fue obtener las características del decremento de la lluvia en la región con base en estaciones pluviométricas elegidas, de acuerdo a su ubicación y a la cantidad de registros con que contaban, siendo las mismas que utiliza el Monitor de Sequía de América del Norte. Posteriormente con base en el SPI (6 meses) generado de manera mensual se estandarizaron de la siguiente manera.

Para la estandarización se tomó en cuenta las siguientes características.

- a. Intensidad de la sequía (ver *Figura113*).
- b. Duración de la sequía (ver *Figura114*).
- c. Persistencia de la sequía (ver *Figura115*).

a) Intensidad de la sequía.

La intensidad se midió con base en el grado de la sequía, tomando el número de meses de valores del SPI₆ con un grado menor que 1, 1.5 y 2 lo cual indica el grado de la sequía. De esta manera se obtuvo la estandarización de la severidad del evento. Se obtuvo un promedio ponderado de las intensidades para las sequías registradas por estación.

b) Duración de la sequía.

En esta parte se tomó en cuenta el número de sequías con una duración menor de 3, 6, 12 y mayor de 12 meses. Así, de esta manera, se contaron los episodios de sequía con esas duraciones asignando valores de 0.25 a los menores de 3 meses, 0.5 a los de menos de 6 meses, 0.75 a los de menor de 12 meses y 1 a los de más de 12 meses. Finalmente se ponderaron y sobre esa ponderación se realizaron la estandarización.

c) Persistencia de la sequía.

Para obtener la persistencia se identificaron el número de sequías en cada una de las estaciones y se dividió entre su número de registros para de esta manera conocer la persistencia de la misma.

Se definió hacer uso del SPI₆ por ser el índice que de acuerdo al capítulo 5 indica el inicio de sequías importantes, por estar relacionado con sequías hidrológicas y por ser el periodo de cálculo que cuenta con un número adecuado de resultados, pues

entre mayor es el periodo de cálculo del SPI, la ausencia de un registro de lluvia aumenta la pérdida de valores calculados.

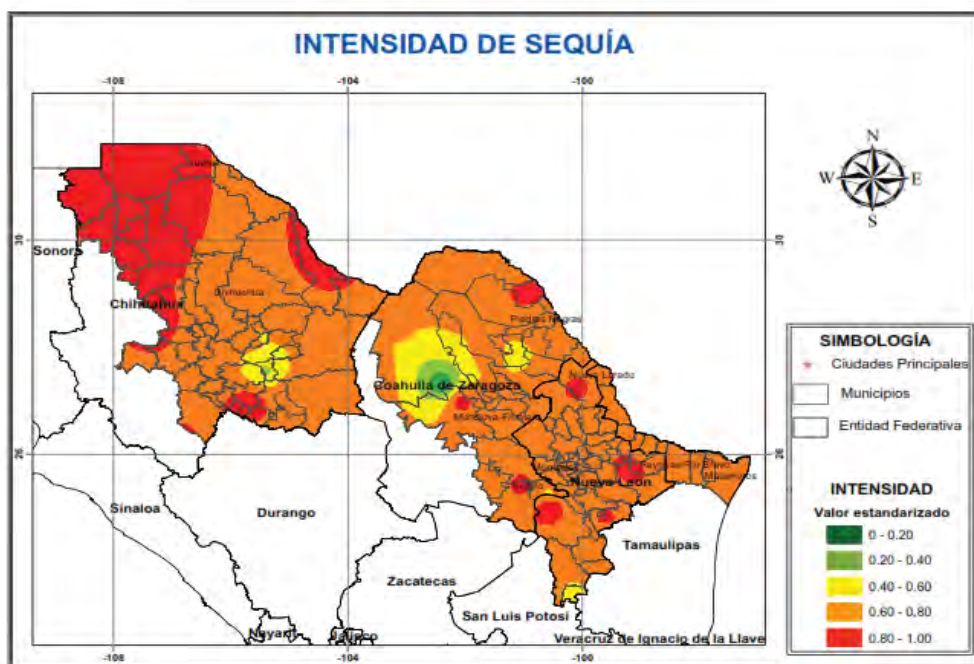


Figura113 Zonas estandarizadas con mayor intensidad de sequía de acuerdo al SPI₆.
Fuente: Elaboración propia.

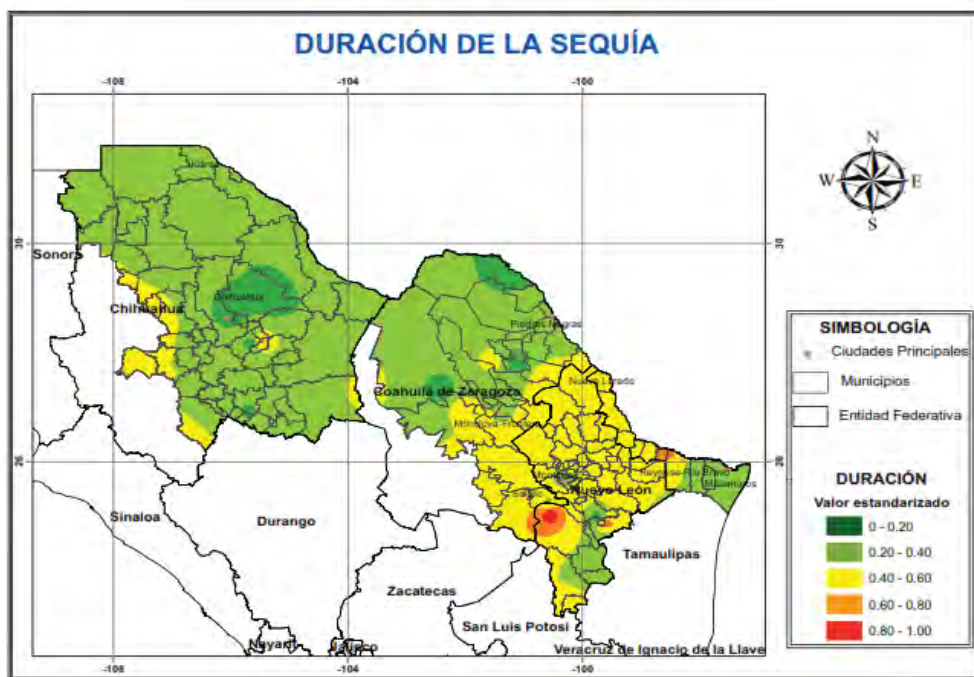


Figura114 Zonas estandarizadas con mayor duración de sequía de acuerdo al SPI₆.
Fuente: Elaboración propia.

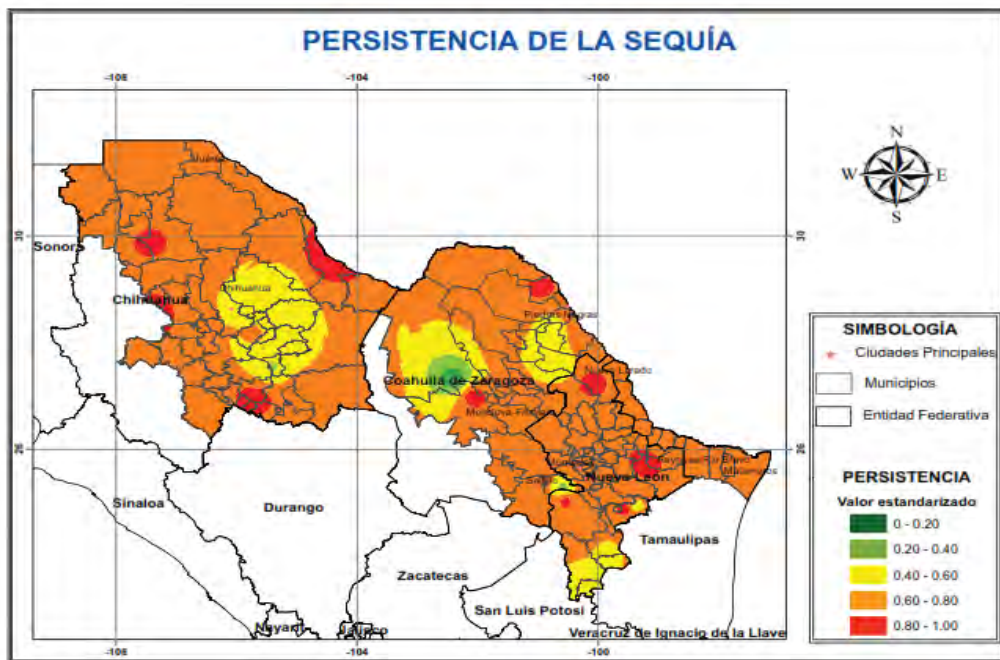


Figura115 Zonas estandarizadas con mayor persistencia de sequía de acuerdo al SPI.
Fuente: Elaboración propia.

Existencia y volumen de presas.

En esta variable se localizaron el número de presas y su capacidad de almacenamiento al NAMO por municipio, esta información fue obtenida del Sistema de Seguridad de Presas, sistema a cargo de la Comisión Nacional del Agua (ver *Figura116*).

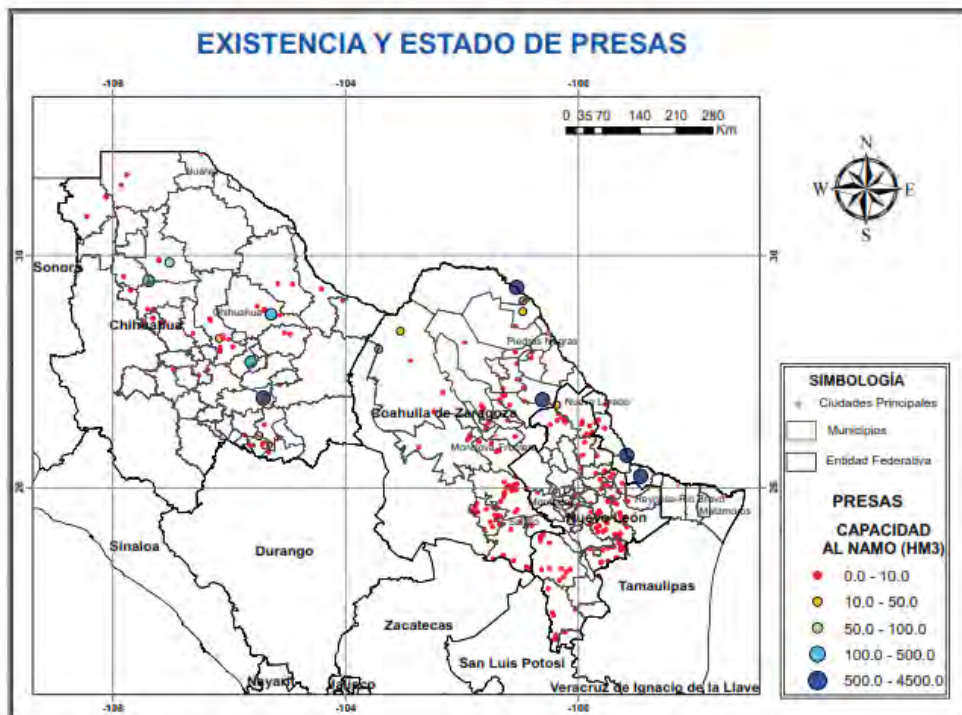


Figura116 Presas en la región con sus capacidades de almacenamiento al NAMO.
Fuente: Elaboración propia con información de (CONAGUA, 2013).

Marginación Social.

Para obtener la marginación social de la Región ante la sequía se utilizó el Índice de marginación social generado por el Consejo Nacional de Población, el cual se estableció a nivel municipal el cual considera para su obtención cada una de las variables siguientes:

- Población total
- % Población de 15 años o más analfabeta
- % Población de 15 años o más sin primaria completa
- % Ocupantes en viviendas sin drenaje ni excusado
- % Ocupantes en viviendas sin energía eléctrica
- % Ocupantes en viviendas sin agua entubada
- % Viviendas con algún nivel de hacinamiento
- % Ocupantes en viviendas con piso de tierra
- % Población en localidades con menos de 5 000 habitantes
- % Población ocupada con ingresos de hasta 2 salarios mínimos
- Índice de marginación
- Grado de marginación

En la *Figura117* se aprecia la distribución de dicho índice en la RHA VI.

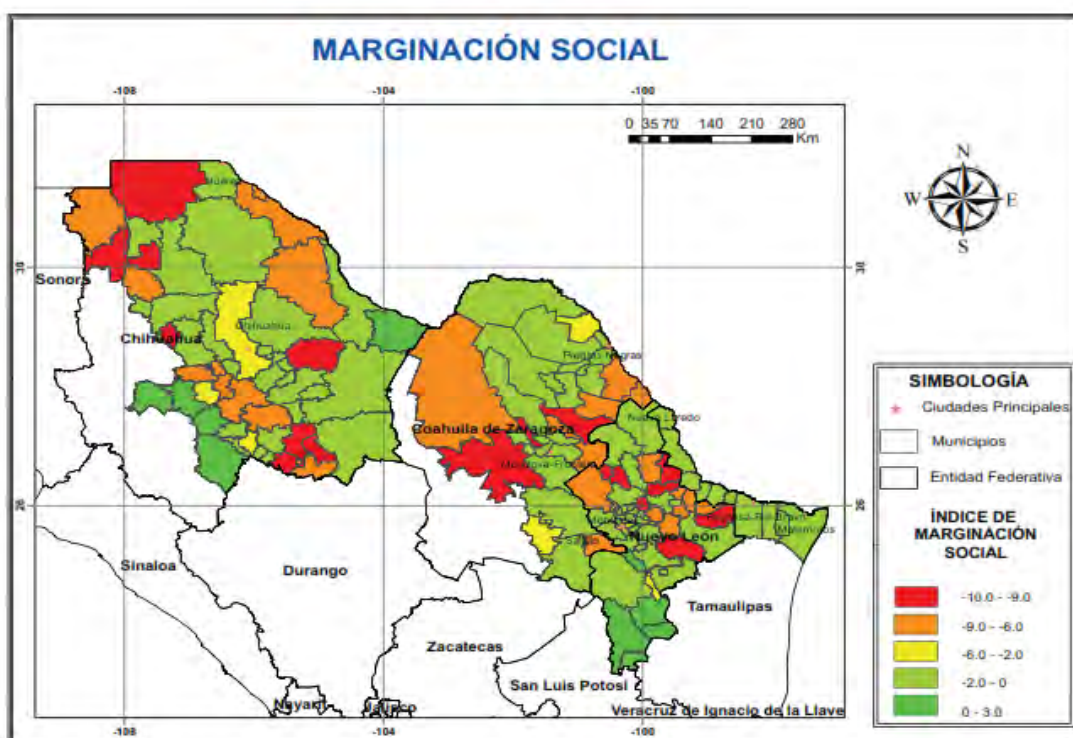


Figura117 Mapa de marginación social en la región.
Fuente: Elaboración propia con información de (CONAPO, 2013)

Los valores de cada uno de los elementos utilizados se estandarizaron mediante el método de reescalamiento, esto ante la necesidad de asignar valores entre 0 y 1 al universo de datos para cada una de las variables.

El método de re-escalamiento se llevó a cabo mediante la siguiente fórmula.

$$y_t^i = \frac{x_t^i - \min V_p(x_t^i)}{\max V_p(x_t^i) - \min V_p(x_t^i)} \in [0, 1] \quad \text{Ecuación 11}$$

Dónde:

- y_t^i es el valor estandarizado de un elemento del universo de datos de una variable.
- i es el superíndice correspondiente al número de elemento correspondiente a una variable.
- t es el subíndice correspondiente al número de variable que se está analizando.
- x_t^i es el valor real del elemento de la variable a estandarizar.
- $\min V_p$ es el valor mínimo del volumen total de datos de la población de una variable.
- $\max V_p$ es el valor máximo del volumen total de datos de la población de una variable.

De esta manera se obtiene el valor de cada una de las variables en un rango entre 0 y 1 lo que facilitará el proceso para la generación de los índices de vulnerabilidad.

Los valores utilizados para la estandarización así como los resultados se muestran en el anexo 5.

6.3 ASIGNACIÓN DE PESOS A LAS VARIABLES ANALIZADAS.

Para la asignación de pesos a cada variable para construir el índice compuesto de vulnerabilidad después de una larga búsqueda de diferentes metodologías se propuso el uso de alguna de las dos siguientes metodologías:

1. Análisis de Componentes Principales.
2. Proceso de Análisis Jerárquico.

Ambas han sido utilizadas en estudios de este tipo pero aplicadas para la obtención de índices de vulnerabilidad al cambio climático y a los procesos de evaluación de proyecciones agrícolas.

Las ventajas y desventajas de cada método se mencionan a continuación.

1. Análisis de componentes principales.

Las Componentes Principales son combinaciones lineales de las variables originales que pueden ser ordenadas en forma decreciente de acuerdo a la cantidad de varianza que ellas contribuyen a computar a partir de los datos originales. Por lo general, la mayor parte de la variabilidad de los datos originales queda condensada en las primeras componentes, las principales. (Gómez & Riesgo, 2008)

Una de las principales desventajas del ACP es que las correlaciones que son la base de su cálculo pueden no necesariamente representar la “influencia real” de las componentes sobre el fenómeno que quiere medirse, sino un efecto estadístico espurio. Asimismo, los resultados obtenidos del ACP pueden ser sensibles a la modificación de la muestra de datos o, como ya se dijo, a la presencia de datos atípicos.

2. Proceso Analítico Jerárquico.

Esta técnica fue desarrollada inicialmente como herramienta de soporte en la toma de decisiones complejas (multidimensionales), pero puede adaptarse perfectamente para la construcción de índices (Gómez & Riesgo, 2008). La metodología fue creada por Saaty (1980) como técnica estructurada pero flexible para la toma de decisiones en un contexto multicriterio. Esta se basa en la formalización intuitiva de problemas a través de una estructura jerárquica como se aprecia en la *Figura118*.

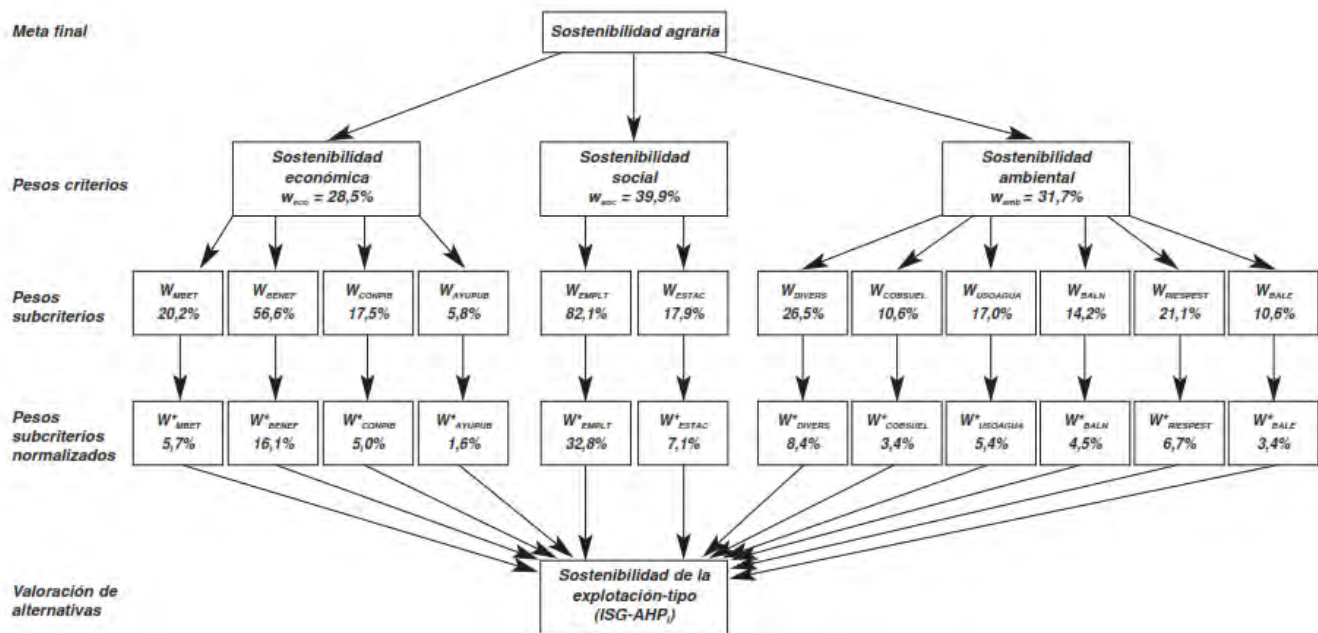


Figura118 Ejemplo de la Jerarquía utilizada en el proceso AHP para la integración de índices.

Fuente: (Gómez & Riesgo, 2008).

Dentro de esta estructura jerárquica, la importancia relativa o ponderaciones (W_k) de los criterios y subcriterios se obtienen sobre la base de comparaciones por pares. Para la realización de estas comparaciones dos a dos, y determinar así la intensidad de preferencia entre cada par de opciones se ha seguido una escala que va del 1 al 9, tal y como propone Saaty (1980). Dichas comparaciones permiten construir las matrices de Saaty a partir de las cuales se estiman los correspondientes vectores de prioridades.

En principio esta técnica del AHP se pensó para decisiones individuales, pero pronto se extendió como técnica válida para la decisión de grupos. Las ponderaciones a utilizar en la investigación requieren considerar las opiniones de un conjunto de personas a partir de las cuales se obtienen las correspondientes matrices de comparación por pares y las correspondientes ponderaciones.

Habitualmente se ha criticado la subjetividad en la estimación de los pesos como un factor clave que puede sesgar los resultados de este tipo de trabajos. En este sentido se ha recomendado el empleo de técnicas objetivas, en las cuales no sea necesario establecer explícitamente una ponderación a los indicadores de base, como por ejemplo el método del ACP. No obstante si se acepta el concepto de vulnerabilidad como una construcción subjetiva, parece necesario introducir en este tipo de análisis las correspondientes preferencias de expertos. Sólo así, el índice de vulnerabilidad tendrá en consideración las tasas de intercambio entre objetivos económicos, sociales y ambientales que se consideran aceptables. Así pues, sin restar utilidad a la técnica de agregación basada en el ACP, parece obvio que los métodos de agregación como el AHP resultan más útiles para el análisis de la Vulnerabilidad.

Por todo lo anterior se utilizó el método del AHP para la asignación de pesos para las diversas variables.

Elaboración y aplicación de encuestas.

Para la integración de los pesos específicos para la obtención de la vulnerabilidad se procedió a aplicar una encuesta a diversos especialistas que tuvieran relación con el manejo del recurso hídrico. Dicha encuesta se implementó de manera piloto dentro del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) donde se aplicó a diversos especialistas, y con los resultados obtenidos se pudo hacer mejorías a la estructuración y claridad de la misma, y adicionalmente se pudo definir los elementos a utilizar y el universo de especialistas encuestados, quedando de la siguiente manera.

- a. Especialista aguas superficiales.
- b. Especialista aguas subterráneas.
- c. Especialista en sequía.
- d. Gestor del agua.
- e. Hidrólogo.
- f. Tomador de decisiones.
- g. Abogado.
- h. Sociólogo.
- i. Ambientalista.
- j. Economista.

Durante la prueba piloto también se reconoció que la ubicación geográfica donde se habían desenvuelto los especialistas influía en las decisiones tomadas. Por lo anterior las encuestas se aplicaron para el mismo número de especialistas en dos regiones.

- A. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- B. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Río Bravo.

De esta manera se contó con un universo de 20 encuestados, expertos en diversas áreas y en diferentes regiones pero con su campo de aplicación dentro de la administración y evaluación del estado del recurso hídrico.

La encuesta aplicada se presenta en la *Figura119*:

Elemento 1	VALOR DEL INDICADOR										Elemento 2
	9	7	5	3	1	3	5	7	9		
DISPONIBILIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL											DISPONIBILIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA
											DEMANDA DE AGUA
											ACTIVIDADES ECONÓMICAS
											ZONAS DE PRESERVACIÓN NATURAL
											INFORMACIÓN DEL ESTADO DEL RECURSO HÍDRICO
											DISPONIBILIDAD DEL CAUDAL ECOLÓGICO
											DECREMENTO DE LA PRECIPITACIÓN
											EXISTENCIA Y ESTADO DE PRESAS PARA ABASTECIMIENTO
DISPONIBILIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA											MARGINACIÓN SOCIAL
											DEMANDA DE AGUA
											ACTIVIDADES ECONÓMICAS
											ZONAS DE PRESERVACIÓN NATURAL
											INFORMACIÓN DEL ESTADO DEL RECURSO HÍDRICO
											DISPONIBILIDAD DEL CAUDAL ECOLÓGICO
										DECREMENTO DE LA PRECIPITACIÓN	

Elemento 1	VALOR DEL INDICADOR										Elemento 2
	9	7	5	3	1	3	5	7	9		
											EXISTENCIA Y ESTADO DE PRESAS PARA ABASTECIMIENTO
											MARGINACIÓN SOCIAL
DEMANDA DE AGUA											ACTIVIDADES ECONÓMICAS
											ZONAS DE PRESERVACIÓN NATURAL
											INFORMACIÓN DEL ESTADO DEL RECURSO HÍDRICO
											DISPONIBILIDAD DEL CAUDAL ECOLÓGICO
											DECREMENTO DE LA PRECIPITACIÓN
											EXISTENCIA Y ESTADO DE PRESAS PARA ABASTECIMIENTO
											MARGINACIÓN SOCIAL
ACTIVIDADES ECONÓMICAS											ZONAS DE PRESERVACIÓN NATURAL
											INFORMACIÓN DEL ESTADO DEL RECURSO HÍDRICO
											DISPONIBILIDAD DEL CAUDAL ECOLÓGICO
											DECREMENTO DE LA PRECIPITACIÓN
											EXISTENCIA Y ESTADO DE PRESAS PARA ABASTECIMIENTO
											MARGINACIÓN SOCIAL
ZONAS DE PRESERVACIÓN NATURAL											INFORMACIÓN DEL ESTADO DEL RECURSO HÍDRICO
											DISPONIBILIDAD DEL CAUDAL ECOLÓGICO
											DECREMENTO DE LA PRECIPITACIÓN
											EXISTENCIA Y ESTADO DE PRESAS PARA ABASTECIMIENTO
											MARGINACIÓN SOCIAL
INFORMACIÓN DEL ESTADO DEL RECURSO HÍDRICO											DISPONIBILIDAD DEL CAUDAL ECOLÓGICO
											DECREMENTO DE LA PRECIPITACIÓN
											EXISTENCIA Y ESTADO DE PRESAS PARA ABASTECIMIENTO
											MARGINACIÓN SOCIAL
DISPONIBILIDAD DEL CAUDAL ECOLÓGICO											DECREMENTO DE LA PRECIPITACIÓN
											EXISTENCIA Y ESTADO DE PRESAS PARA ABASTECIMIENTO
											MARGINACIÓN SOCIAL
DECREMENTO DE LA PRECIPITACIÓN											EXISTENCIA Y ESTADO DE PRESAS PARA ABASTECIMIENTO
											MARGINACIÓN SOCIAL
EXISTENCIA Y ESTADO DE PRESAS PARA ABASTECIMIENTO											MARGINACIÓN SOCIAL

Figura119 Encuesta aplicada para la integración de índices.
Fuente: Elaboración propia.

Para la contestación de las encuestas se explicó al especialista el tipo de comparación que debía hacer y en qué consistía cada una de las variables comparadas.

Con lo anterior se contó con una base de datos que mediante el proceso del AHP a través del uso del programa “Superdesision” permitió realizar el siguiente análisis para generar los pesos específicos de cada variable.

Implementación del software Superdesision.

Mediante el programa **Superdesision** se implementó la metodología del AHP, y con el universo de muestreo se obtuvieron los valores de prioridades mostrados en la Tabla 24.

Tabla 24 Resultados de la asignación de pesos mediante el AHP.

VARIABLE ANALIZADA	PESO ESPECIFICO
1 Disponibilidad del agua superficial	0.09
2 Disponibilidad del agua subterránea	0.10
3 Demanda de agua	0.07
4 Actividades económicas	0.09
5 Zonas de preservación natural	0.08
6 Información del estado del recurso hídrico	0.09
7 Disponibilidad del caudal ecológico	0.06
8 Decremento de la precipitación	0.17
9 Existencia de presas para abastecimiento	0.11
10 Marginación social	0.15

Fuente: *Elaboración propia.*

Al observar la metodología del AHP se consideró pertinente un Análisis de Proceso de Redes (ANP), el cual consiste en valorar al igual que en el AHP las decisiones tomadas por los especialistas para cada variable, con la diferencia de que posteriormente al proceso del AHP, el ANP asigna a cada uno de los especialistas un peso sobre la decisión de los demás, por ejemplo, para la variable “Disponibilidad del agua superficial” se les asignó mayor peso a las respuestas de los especialistas en agua superficial, en sequías y al hidrólogo, dicha importancia se asignó realizando comparaciones entre los especialistas dándoles mayor peso a los tres indicados, quedando la importancia de la respuesta de cada uno de los especialistas para esta variable como se observa en la Tabla 25.

Tabla 25 Asignación de pesos a la decisión de especialistas para el análisis del ANP.

ENCUESTA	ESPECIALISTA	PESO DE DECISIÓN
IMTA	Especialista aguas superficiales.	0.1324
OCRB	Especialista aguas superficiales.	0.1324
IMTA	Especialista aguas subterráneas.	0.0147
OCRB	Especialista aguas subterráneas.	0.0147
IMTA	Especialista en sequía.	0.1324
OCRB	Especialista en sequía.	0.1324
IMTA	Gestor del agua.	0.0147
OCRB	Gestor del agua.	0.0147
IMTA	Hidrólogo.	0.1324
OCRB	Hidrólogo.	0.1324
IMTA	Tomador de decisiones.	0.0147
OCRB	Tomador de decisiones.	0.0147
IMTA	Abogado.	0.0147
OCRB	Abogado.	0.0147
IMTA	Sociólogo.	0.0147
OCRB	Sociólogo.	0.0147
IMTA	Ambientalista.	0.0147
OCRB	Ambientalista.	0.0147
IMTA	Economista.	0.0147
OCRB	Economista.	0.0147
	TOTAL	1.0000

Fuente: *Elaboración propia.*

Lo mismo se aplicó en las demás variables, dando preferencia a la decisión de tres tipos de especialistas que tuvieran una relación más estrecha con la variable analizada, dando más valor en total a la decisión de 6 especialistas (2 por tipo de área de desenvolvimiento) por cada variable analizada.

A este proceso se le denomina Análisis de Proceso de Redes (ANP por sus siglas en inglés) y el resultado comparado con el AHP se muestra en la Tabla 26 y en la *Figura120*.

Tabla 26 Comparación de resultados de la asignación de pesos mediante AHP y ANP.

VARIABLE	PESO ESPECIFICO	
	AHP	ANP
1 Disponibilidad del agua superficial	0.09	0.10
2 Disponibilidad del agua subterránea	0.10	0.08
3 Demanda de agua	0.07	0.07
4 Actividades económicas	0.09	0.10
5 Zonas de preservación natural	0.08	0.07
6 Información del estado del recurso hídrico	0.09	0.11
7 Disponibilidad del caudal ecológico	0.06	0.05
8 Decremento de la precipitación	0.17	0.15
9 Existencia de presas para abastecimiento	0.11	0.11
10 Marginación social	0.15	0.14
	1.00	1.00

Fuente: *Elaboración propia.*

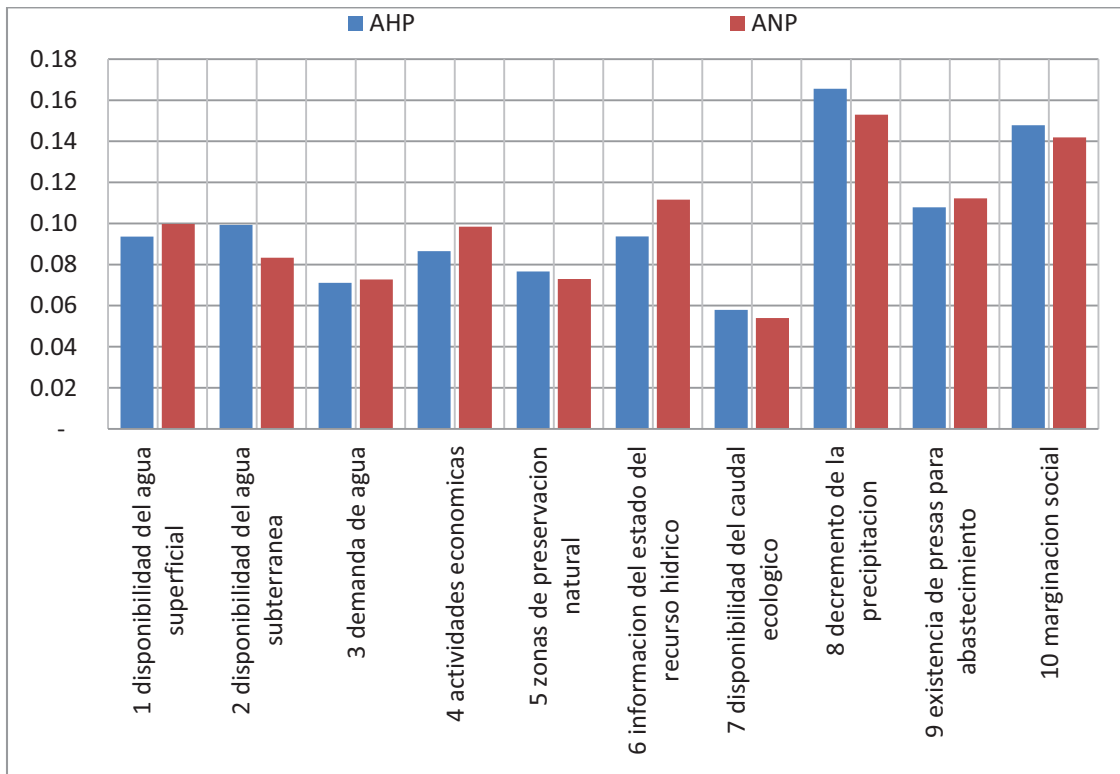


Figura 120 Comparación de resultados de la asignación de pesos mediante AHP y ANP.

Fuente: *Elaboración propia.*

Como se observa el comportamiento de los resultados de ambas metodologías son muy similares, por lo que en conclusión se determinó trabajar con los pesos obtenidos mediante el ANP debido a que con ese modelo se asigna un mayor peso a la opinión de especialistas que en concreto tienen mayor conocimiento o influencia en cada una de las variables analizadas.

A continuación se muestra la integración de cada una de las vulnerabilidades para la elaboración de las estandarizaciones y obtención de la vulnerabilidad económica, ambiental y social así como la vulnerabilidad global de cada una de los estados que conforman la RHA VI.

6.4 OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD A LA SEQUÍA.

Con los resultados obtenidos se procedió a hacer el cruce de las estandarizaciones de los valores de los elementos con los pesos de cada elemento obtenido en el subcapítulo 6.3.

Para cada vulnerabilidad al utilizarse elementos diferentes, se asignó valor cero a los elementos que no integraban parte de la vulnerabilidad estudiada, ajustando los demás valores de tal modo que la suma de todos los elementos utilizados sumara 1.

Lo anterior con la finalidad de detallar los tipos de vulnerabilidades para de esta manera saber en qué medida y porque es vulnerable una región, ya que alguna zona puede no ser vulnerable económicamente pero si ambientalmente o socialmente.

En la *Figura121*, *Figura122*, *Figura123* y *Figura124* se muestran los pesos utilizados para cada una de las vulnerabilidades.

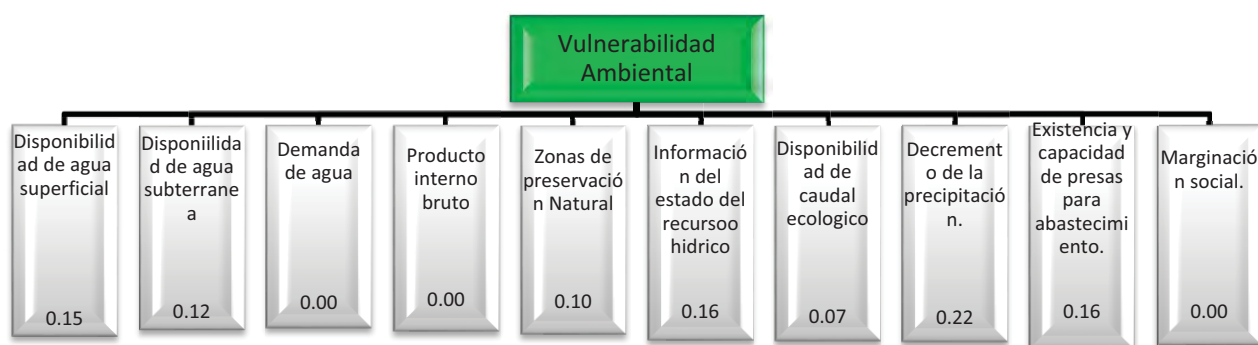


Figura121 Integración de la vulnerabilidad ambiental.

Fuente: Elaboración propia.



Figura122 Integración de la vulnerabilidad económica.
Fuente: Elaboración propia.



Figura123 Integración de la vulnerabilidad social.
Fuente: Elaboración propia.



Figura124 Integración de la vulnerabilidad global.
Fuente: Elaboración propia.

Con los pesos específicos mostrados y con las estandarizaciones mostradas en el anexo 5, se presentan los resultados de las vulnerabilidades en las figuras 125, 126, 127 y 128.

VULNERABILIDAD AMBIENTAL

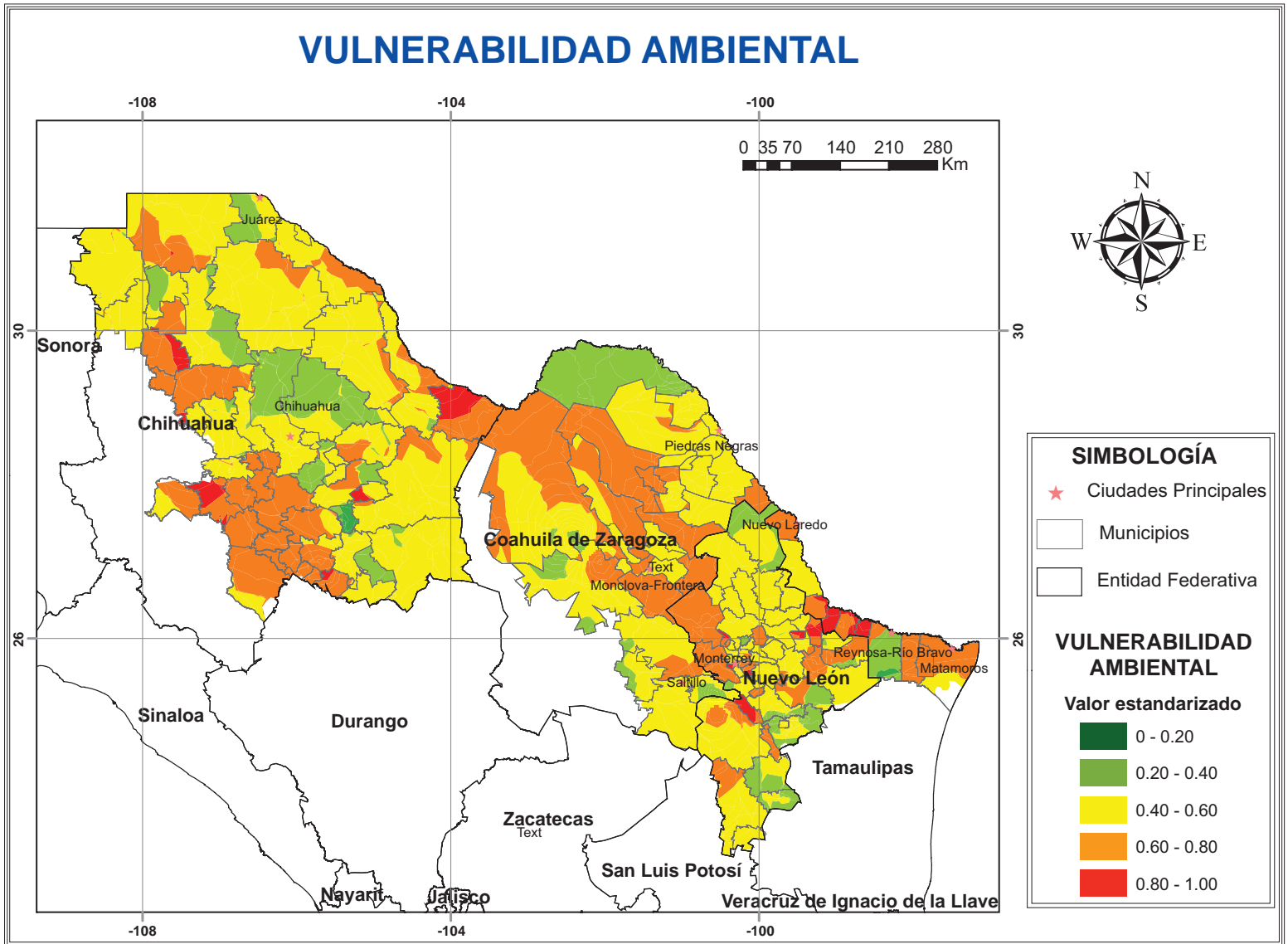


Figura125 Vulnerabilidad ambiental en la RHA VI

VULNERABILIDAD ECONÓMICA

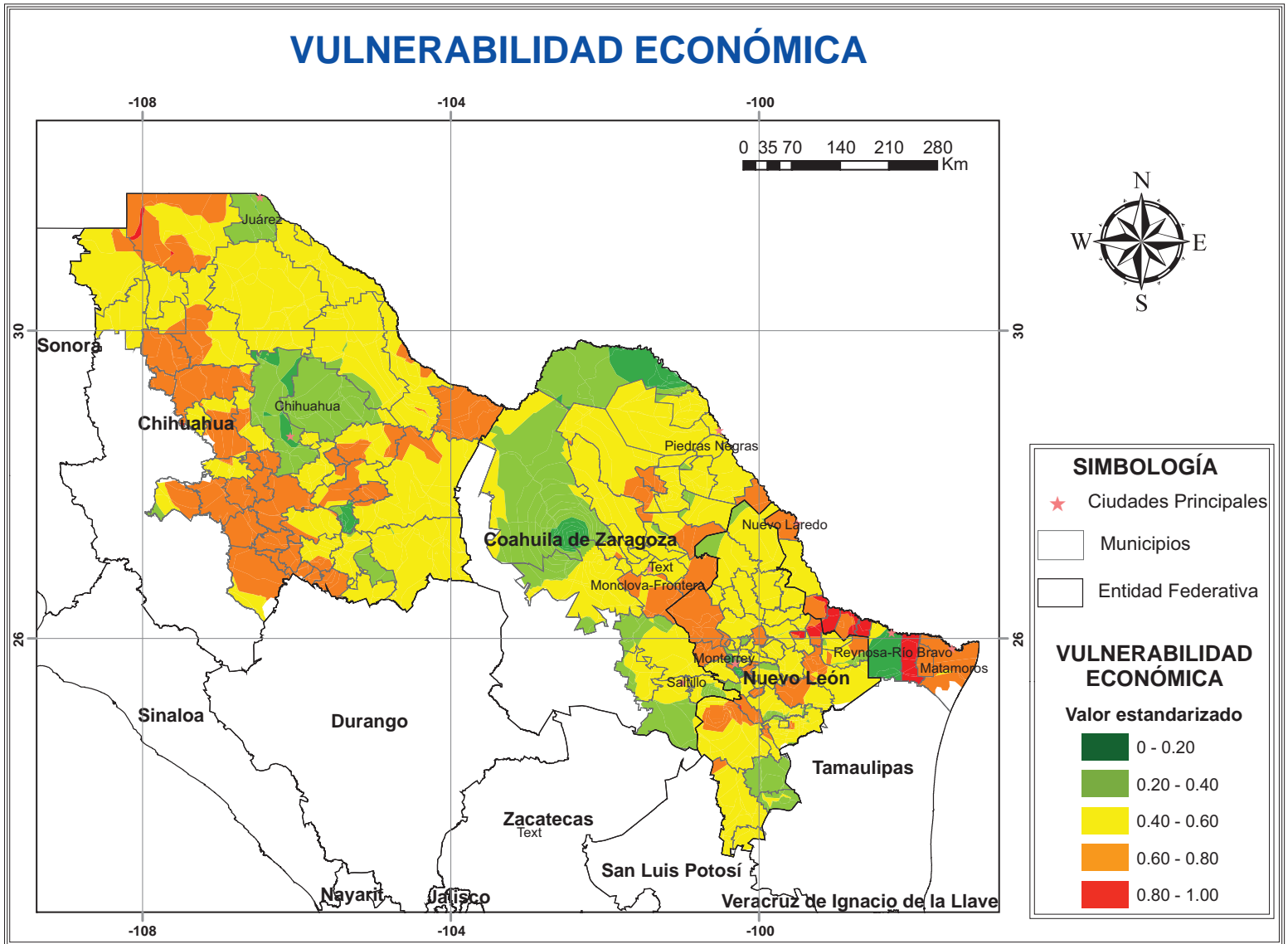


Figura126 Vulnerabilidad económica en la RHA VI

VULNERABILIDAD SOCIAL

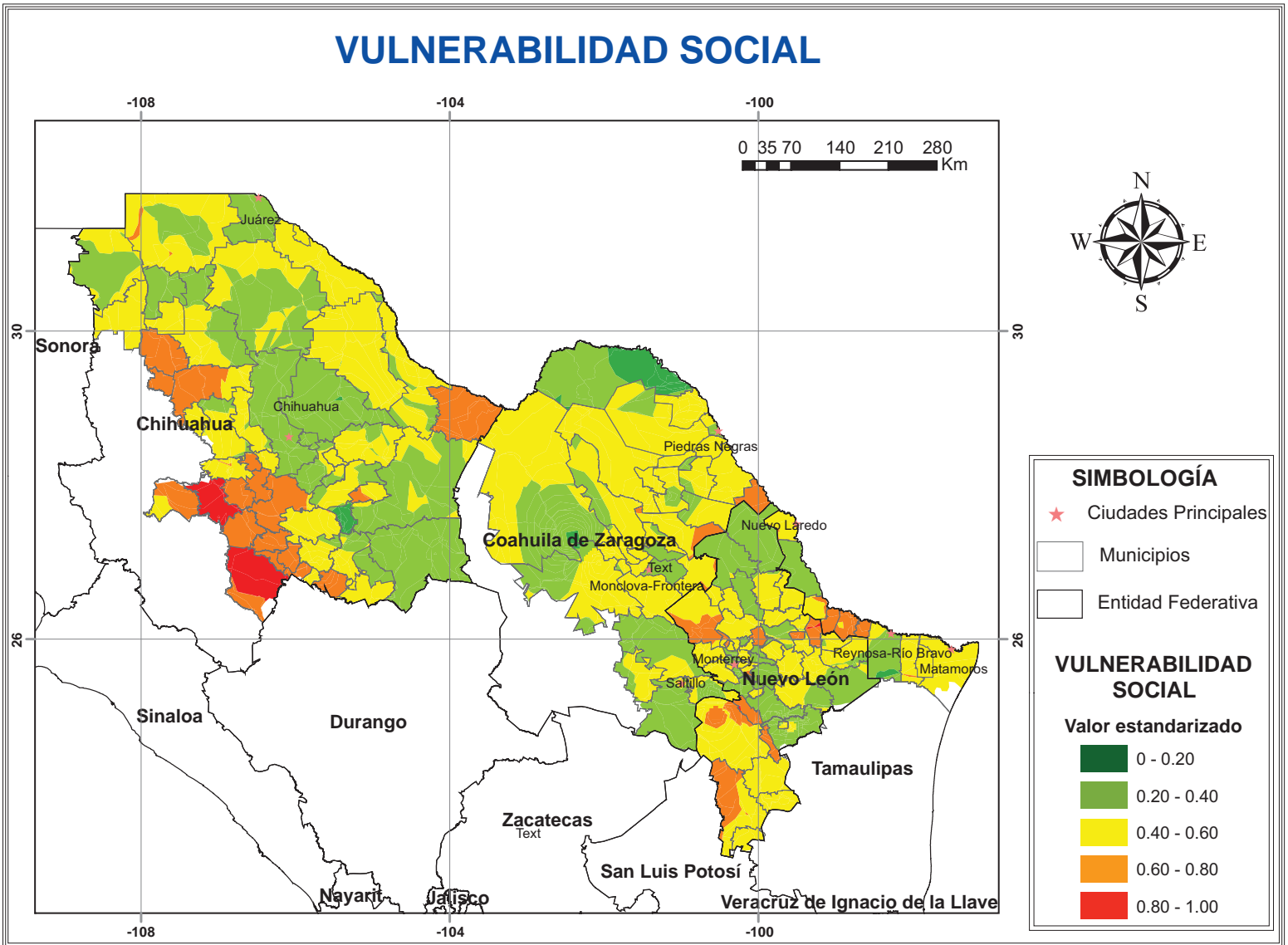


Figura127 Vulnerabilidad social en la RHA VI

VULNERABILIDAD GLOBAL

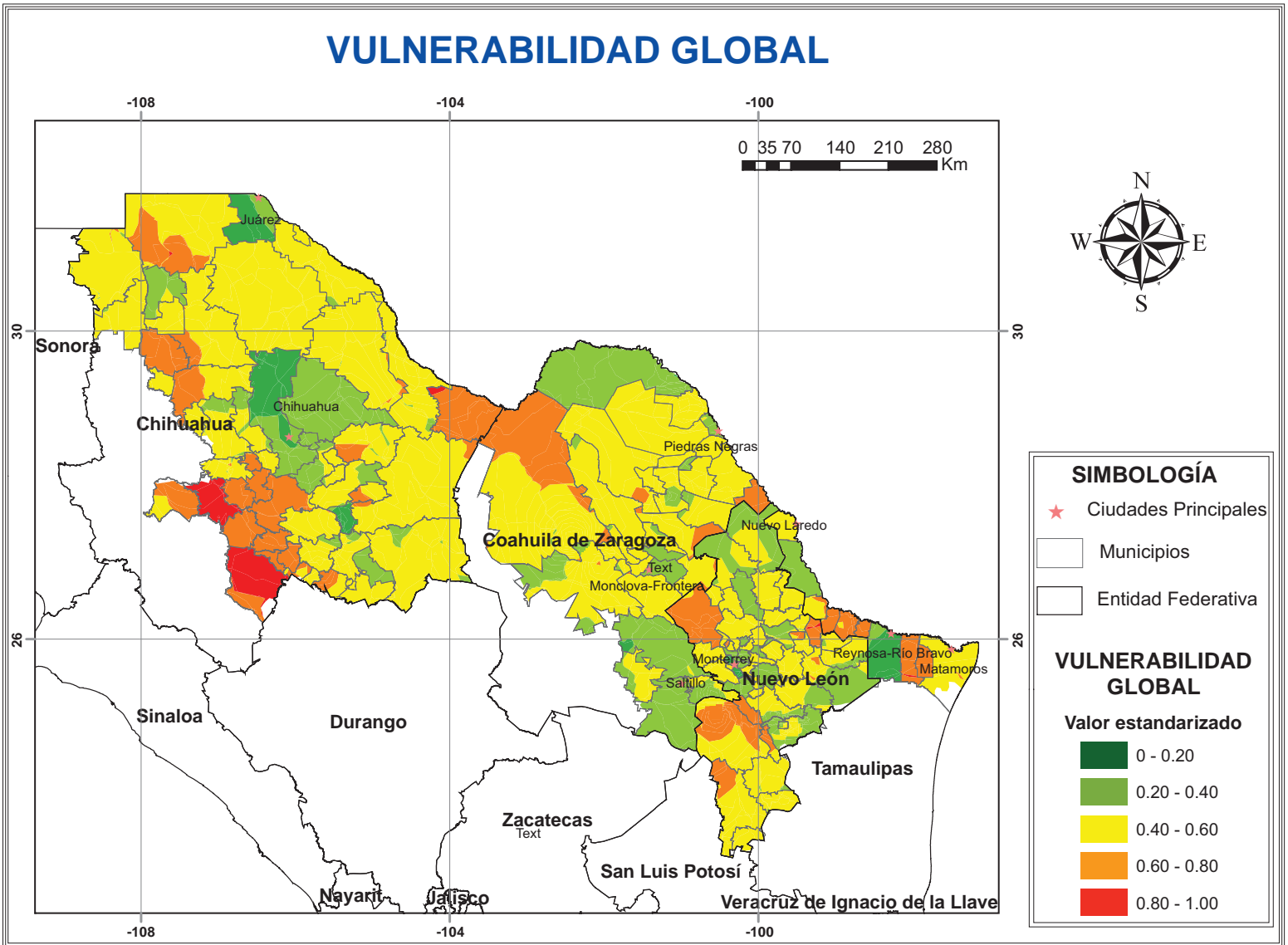


Figura128 Vulnerabilidad global en la RHA VI

7. CONCLUSIONES DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.

La vulnerabilidad a la sequía es un tema que poco ha sido estudiado en México, las definiciones y metodologías existentes en el área continúan en desarrollo. En el presente trabajo de investigación se busca contribuir a dicho desarrollo, para lo cual se propone una metodología que permita determinar el grado de vulnerabilidad en la región y al mismo tiempo caracterizar los componentes que la integran.

De la investigación realizada se presentan las siguientes conclusiones:

1. La región presenta una aridez y deficiencia de humedad natural por su ubicación geográfica, y debido a que se encuentra en el hemisferio norte donde existe una menor masa de agua en comparación con el hemisferio sur, tiende a presentar un clima más estacional y variable.
2. Durante la caracterización de la sequía se identificó que los aspectos que resultan de mayor peligro para la zona son la intensidad y la persistencia de los episodios de sequía. La duración es un aspecto que resultó mayormente peligroso para la zona sureste de Coahuila y la mayor parte del estado de Nuevo León.
3. El uso del SPI₁₂ y el SPI₂₄ se asoció en gran medida con los resultados de los índices de sequía hidrológica por lo que podrían ser utilizados como un buen indicador de sequía hidrológica. Sin embargo el SPI₆ y el SPI₉ no pierde utilidad, pues se verificó que anticipa el desarrollo de sequías importantes.
4. Al verificar el comportamiento de la sequía meteorológica se observó una alta correlación de los periodos de sequía que eran largos, intensos y que abarcaban todos los estados de la RHA VI con los periodos en los que iniciaba la actividad solar, específicamente en el periodo en que se incrementa la aparición de manchas solares hasta alcanzar su máximo, por lo que mediante el monitoreo del comportamiento de las manchas se podría prevenir y estar a la expectativa del desarrollo de sequías importantes.
5. Con respecto a la relación de las sequías meteorológicas con el fenómeno del ENSO se mostró que no existe una relación tan marcada de las sequías con El Niño o La Niña, pues de acuerdo a los datos del SPI comparados con los años de El Niño o La Niña, existieron años donde la sequía se desarrolló durante la ocurrencia de El Niño, otras durante la ocurrencia de La Niña y otras en periodos donde no hubo variaciones importantes de acuerdo al índice ONI. Sin embargo la mayoría de los eventos de sequía meteorológica se desarrollaron en el cambio de El Niño a La Niña.
6. Conforme a la vulnerabilidad ambiental las zonas más críticas son los municipios de Múzquiz en Coahuila; Balleza, Carichí, La Cruz, Gómez Farías,

Gran Morelos, Ignacio Zaragoza, Manuel Benavides, Matamoros, Namiquipa, Nonoava, San Francisco de Borja y San Francisco del Oro en Chihuahua; Los Aldamas, San Pedro Garza, Juárez, Melchor Ocampo, Rayones e Hidalgo en Nuevo León; y finalmente Camargo, Gustavo Díaz Ordaz, Mier y Miguel Alemán en Tamaulipas. En general los municipios más susceptibles son los del Suroeste de Chihuahua por no contar con una red tan amplia de información para medición, no tener almacenamientos importantes para circunstancias de emergencia por sequía y porque sus respectivas cuencas están bajo un régimen de caudal ecológico deficiente. Los de la zona centro de Coahuila y Nuevo León son vulnerables por la misma razón aunado a que no cuentan con disponibilidad de aguas superficial. En la zona con altas vulnerabilidades ambientales la sequía se caracterizó con una intensidad alta, una alta persistencia y largas duraciones principalmente en Coahuila y Nuevo León.

7. En cuanto a la vulnerabilidad económica los municipios que figuran son Ascensión, La Cruz, Gran Morelos, Ignacio Zaragoza y Namiquipa en Coahuila; Los Aldamas, Melchor Ocampo y Rayones en Nuevo León; y Mier, Miguel Alemán, Río Bravo y Valle Hermoso en Tamaulipas. Dichos municipios son los más vulnerables, sin embargo, la mayor parte del Estado de Chihuahua presenta una alta vulnerabilidad económica. Asimismo la mayor parte de los estados de Coahuila y Nuevo León presentan una vulnerabilidad económica importante. Los municipios mencionados se encuentran con sus cuencas superficiales sobreexplotadas y algunos de los municipios con vulnerabilidad económica alta para Chihuahua tienen sus acuíferos sobreexplotados. La mayor parte de los municipios en la región tienen un PIB muy bajo en comparación con el de las grandes ciudades como Chihuahua, Ciudad Juárez y Monterrey. En cuanto a la caracterización de la sequía los municipios que destacan presentan sequías intensas y con una alta persistencia. En la parte sureste de Coahuila y en todo Nuevo León las sequías son de larga duración.
8. En cuanto a la vulnerabilidad social, son los municipios de la zona serrana al suroeste de Chihuahua los más vulnerables, de igual forma la mayor parte del estado de Coahuila y el centro y sur de Nuevo León. Dichas zonas son vulnerables por los altos índices de marginación que presentan. Las zonas que resultaron con una vulnerabilidad media alta es porque no presentan disponibilidad superficial, además de no contar con almacenamientos cercanos para solventar el desabasto en temporada de estiaje. En cuanto a la caracterización de las sequías las zonas que resultaron más vulnerables tienen sequías intensas y persistentes. En el caso de los municipios dentro de Nuevo León y Coahuila presentan sequías de larga duración.
9. Finalmente, la vulnerabilidad global resultó mayor para los municipios al Suroeste y Noreste de Chihuahua, la mayor parte del estado de Coahuila y los

municipios al centro y sur de Nuevo León. Para el caso de Tamaulipas todos sus municipios dentro de la RHA VI presentan una vulnerabilidad importante a excepción de los municipios de Reynosa y Gustavo Díaz Ordaz.

10. En general se diferencian zonas con mayor vulnerabilidad que otras, sin embargo esto no significa que se pueda restar atención a las zonas que resultaron con una vulnerabilidad baja, pues se debe recordar que la obtención de la vulnerabilidad fue en comparación con las características ambientales, económicas y sociales de los municipios de la Región. Si se revisara la vulnerabilidad de los municipios de la RHA VI con las de los municipios a nivel nacional podría incrementarse la vulnerabilidad de los municipios de la RHA VI.
11. Con los resultados del presente trabajo de investigación se lograron los objetivos propuestos al inicio del mismo, ya que se identificaron las zonas más vulnerables de la RHA Río Bravo a la sequía así como sus causas. Asimismo se logró una caracterización de la sequía conforme a determinación de valores de intensidad, duración y persistencia.

8. RECOMENDACIONES.

1. Es necesario complementar la información del monitor de sequías con obtención de muestras en campo, vuelos aéreos y actividades locales e integrar mediante un organismo regulador que, en conjunto con el monitor de sequía y con la información recabada en campo, se encargue de monitorear el desarrollo y la intensidad de una sequía.
2. Se recomienda implementar estudios del comportamiento de la fauna y la flora así como otros componentes ambientales para especificar si existe alguna relación entre el comportamiento de algunas especies que ayuden a prevenir episodios de sequía como en el caso de los agricultores andinos.
3. Es necesario en primera instancia, dar mantenimiento a la red existente de medición y posteriormente poner en marcha más estaciones de medición. Principalmente en la parte de calidad del agua ya que así como la cantidad limita el uso del recurso, la calidad es un parámetro que limita la disponibilidad. Lo anterior principalmente en la calidad del agua subterránea que es una fuente importante de abastecimiento en la región.
4. Es imprescindible regular el crecimiento de la actividad industrial en zonas donde la disponibilidad de agua es nula o muy baja, pues no sólo será complicado abastecer su demanda hídrica, sino también se tendrá el costo de inversión en infraestructura para abastecimiento, lo que podría dar pie a un posterior crecimiento de población en las cercanías que agravaría el problema

de desabasto, lo cual podría generar una desestabilidad económica, social y ambiental.

5. Cuidar las condiciones ambientales de la región es de vital importancia, pues durante los análisis para la obtención de la vulnerabilidad se reconoció un fuerte problema de caudal ecológico deficiente y sobreexplotación de recursos naturales, lo anterior anticipando que un cambio en el funcionamiento natural del ecosistema acarrearía circunstancias impredecibles que podrían resultar de gran riesgo para la subsistencia de los municipios en la región.
6. Se recomienda monitorear la actividad solar y compararla con el comportamiento de la sequía principalmente con el SPI₆ y con el SPI₁₂ en la región con la intención de alertar ante posibles episodios de sequías extremos y mitigar los efectos adversos.
7. El Fenómeno de el Niño y La Niña a pesar de producirse en el océano pacífico tienen una gran repercusión a nivel mundial, por lo que se recomienda monitorear al igual que dichos fenómenos la corriente del Atlántico Norte, pues tiene una gran relación con el clima en Norteamérica.

REFERENCIAS

- Aparicio, J., & Velasco, I. (2004). Evaluación de índices de sequía en las cuencas de afluentes del río Bravo/Grande. *Tecnología y ciencias del agua*, 37-53.
- Arreguín, F., López, M., Velásquez, C., & López, R. (2013). Análisis de índices de Sequía, para las cuencas transfronterizas de los ríos Bravo y Colorado. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 117-148.
- Barrera, A. (2004). *Técnicas de completado de series mensuales y aplicación al estudio de la influencia de la NAO en la distribución de la precipitación en España*. . Barcelona: GAMA.
- Castorena, G. (1980). *Análisis histórico de las sequías en México*. México, D.F.: SRH.
- CENAPRED. (2001). *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México*. México, D.F.: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- CENAPRED. (2002). *Sequías*. México, D.F.: CENAPRED.
- CENAPRED. (2006). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de riesgos y peligros*. Mexico, D.F.: CENAPRED.
- CFE. (2012). *Estadísticas de las centrales generadoras*. Obtenido de http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/Estadisticas/_layouts/mobile/view.aspx?List=147f7738-221c-48e1-9abe-a20d67dbaa92&View=ca721019-c0d6-4786-b8a6-3766c7b2ad57
- CienciayBiología. (2012). *Ciencia y Biología*. Obtenido de <http://www.cienciaybiologia.com/bmarina/ninyo.htm>
- Claverías, R. (1990). *Conocimientos de los campesinos Andinos sobre los predictores Climáticos: elementos para su verificación*. Lima: CIED.
- CONABIO. (2012). *Portal de Geoinformación Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad*. Obtenido de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAGUA. (2009). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Meoqui-Delicias, Estado de Chihuahua*. México D.F.: CONAGUA.
- CONAGUA. (2011). *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego año agrícola 2009-2010*. México, D.F.: SEMARNAT.
- CONAGUA. (2011). *Estadísticas del agua en México*. México, D.F.: SEMARNAT.

- CONAGUA. (2011). *Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento*. México, D.F.: SEMARNAT.
- CONAGUA. (2013). Almacenamientos mensuales en las principales presas de la RHA VI. Monterrey, Nuevo León, México.
- CONAGUA. (2013). Datos de la red convencional y automática de medición hidrológica. Monterrey, Nuevo León, México: CONAGUA, OCRB.
- CONAGUA. (2013). *Programa Nacional Contra la Sequía (PRONACOSE)*. Obtenido de <http://www.pronacose.gob.mx/>
- CONAGUA. (2013). *Sistema Nacional de Información del Agua*. Obtenido de <http://201.116.60.25/sina/>
- CONAGUA, 2. (2012). Registro Público de Derechos del Agua. *REPDA*. México, D.F.: CONAGUA.
- CONAPO. (2013). *Índice de vulnerabilidad social municipal*. México, D.F.: CONAPO.
- De Jager, C., & Duhau, S. (2011). The variable solar dynamo and the forecast of solar activity. Influence in terrestrial surface temperature. *NOVA Science Publishers, Inc.*, 77-106.
- Depetris, P. (Junio-Julio 2010). Las ciencias de la tierra y el cambio climático global. *Ciencia hoy*, 8-15.
- Díaz, V. (2007). *El cielo del mes*. Obtenido de <http://www.elcielodelmes.com/>
- DOF. (2013). *NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*. . México D.F.: Diario Oficial de la Federación.
- Escalante, C., & Reyes, L. (2012). Análisis de la sequía meteorológica en el norte de México. *Tlaloc*.
- Florescano, E. (2000). *Breve historia de la sequía en México*. Distrito Federal: CONACULTA.
- Florescano, E. (2001). Las sequías en México: un breve esbozo. *Teorema ambiental*.
- Gallardo, Y., & Brown, O. (2006). *Índicadores de sequía*. Ciego de Ávila.
- García, A. (2006). *Sequías teoría y prácticas*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- García, V. (1997). *Historia y desastres en América Latina, Volumen II*. Perú: CIESAS.
- Gómez, J., & Riesgo, L. (2008). Diseños alternativos para un índice de sostenibilidad agrícola: el caso de la agricultura de regadío del Duero. . *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros* , 135-179.
- Hernández, J. (2004). Sequía e inestabilidad social en México. *Aquaforum*.

- Hil, S. (Febrero de 2013). NASA. Obtenido de http://www.nasa.gov/mission_pages/hinode/solar_004.html
- IMTA. (2010). Extractor de información rápida . *ERICK 3 v II*. Jiutepec, Morelos: SEMARNAT.
- INEGI. (2010). *XIII Censo de población y vivienda 2010*. México, D.F.: INEGI.
- IPCC. (2007). *Summary for Policymakers. The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: IPCC.
- IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge: IPCC.
- Jurgen, H. e. (2011). *Las cuencas Hidrográficas de México*. Mexico, D.F.: INECC.
- Karavitis, C. e. (2013). *Drought Management Centre for Southeastern Europe (DMCSEE)*. Obtenido de <http://www.dmcsee.org/>
- Kumar, R. (2009). *Earth Observation Data Intregation and Fusion Research Initiative*. Obtenido de http://www.editoria.u-tokyo.ac.jp/projects/awci/5th/file/pdf/091216_awci/4.3-3-2_CR_India2.pdf
- Magaña, V. (1998). El niño y la oscilación del sur, sus impactos en México. *Ciencias*, 14-18.
- Martínez, P., & Patiño, C. (2010). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. Jiutepec, Mor.: IMTA.
- McKee et al. (1993). *Metodología del SPI*. Dallas: American Meteorological Society.
- NMX. (2012). *NMX-AA-159-SCFI-2012*. México, D.F.: NMX.
- NOAA. (2013). *National Weather Service*. Obtenido de http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml
- NSF. (2013). *Paleoclimate Program of the National Science Foundation*. Obtenido de North American Drought Atlas: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.LDEO/.TRL/.NADA2004/.pdsi-atlas.html>
- Ortega - Gaucín, D. (2012). *Sequía en Nuevo León: vulnerabilidad, impactos y estrategia de mitigación*. Apodaca, N.L.: Instito del Agua del Estado de Nuevo León.
- Presidencia. (2012). Anexo estadístico del sexto informe de gobierno. México, D.F.: PRESIDENCIA.
- Richardson, G. (2008). *Las grandes sequías mayas. Agua, vida y muerte*. USA: Fondo de Cultura Económica.

Roja, F. I. (s.f.). *Federacion Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja*. Recuperado el Octubre de 2013, de <http://www.ifrc.org/es/introduccion/disaster-management/sobre-desastres/definicion--de-peligro/sequias/>

Royal Observatory of Belgium. (2013). *Solar Influences Data Analysis Center (SIDC)*. Obtenido de <http://sidc.oma.be/index.php>

SEMARNAT. (2011). *El ambiente en números*. México, D.F.: SEMARNAT.

Thomas, W. e. (2009). Multi-Millennial Fire History of the Giant Forest, Sequoia National Park, California, USA. *fireecology*, 120-127.