



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

**ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI) Y SU RELACIÓN CON
SUPERFICIE AGRÍCOLA SINIESTRADA EN EL ESTADO DE ZACATECAS**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
ERIKA SEGUNDO DE JESÚS

DIRECTOR DE TESIS
DR. JUAN CARLOS GÓMEZ ROJAS
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, ENERO 2018



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.

Agradecimientos

A Dios.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de seguir aprendiendo el largo proceso de aprender.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que me brindó en el transcurso de la maestría y durante mi estancia académica.

A mi asesor de tesis, Dr. Juan Carlos Gómez Rojas, que siempre me animó y me impulsó a terminar mi trabajo de investigación. A los miembros de mi sínodo: Dra. Rosalía Vidal Zepeda, Mtro. Armando García de León Loza y Dr. Víctor Luis Barradas Miranda; gracias por el tiempo que se tomaron en revisar mi trabajo y por sus valiosas aportaciones.

Al Dr. Antonio Moreno Jiménez por su tiempo y apoyo durante mi estancia académica en la Universidad Autónoma de Madrid (UAM). Gracias por todo lo que me enseñó, sin su orientación no me habría sido posible consolidar la estructura de mi investigación. Usted fue la mejor guía para seguir conociendo nuevos ambientes.

A la Dra. Rosa Cañada Torrecilla, gracias por todas las sugerencias y por el interés en mi tema de tesis.

A los profesores: Concepción Camarero Bullón, Fernando Allende Álvarez y Felipe Fernández García por darme la posibilidad de aprender de ustedes en sus clases y prácticas de campo.

A Natalia Fontecha Cuenca por brindarme su amistad sincera. Gracias Naty, sin ti mi estancia no hubiera sido igual.

A Ivonne y Adriana que estuvieron conmigo cuando las necesité. Gracias por ser las amigas que ya no pensaba encontrar.

A los amigos que siempre han estado conmigo: Arturo, Jesús, Anel, Laura, Paty y Carmen. Gracias por su apoyo incondicional.

A Moisés, porque me quieres a pesar de conocerme como nadie más.

Índice

Introducción	1
Capítulo I La sequía como fenómeno hidrometeorológico y sus efectos sobre la actividad agrícola en México	5
1.1 Fenómenos hidrometeorológicos extremos	5
1.1.1 Concepto de sequía y características principales	9
1.1.1.1 Tipos de sequía	11
1.1.1.2 El fenómeno de El Niño y La Niña; su relación con las sequías	13
1.1.1.3 El Niño, La Niña y sus efectos en la República Mexicana	17
1.1.2 Métodos usados para dimensionar eventos de sequía	18
1.1.2.1 Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI)	19
1.1.2.2 Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)	21
1.1.2.3 Índice Estandarizado de Precipitación Evapotranspiración (SPEI)	26
1.2 Efectos de la sequía 2011-2012 en la producción agrícola de México	27
1.3 Medidas para mitigar la sequía en México	31
1.4 Enfoques metodológicos en relación con los efectos de sequía agrícola	33
1.4.1 Hacia una propuesta de metodología representativa	36
Capítulo II Estado de Zacatecas: medio físico y actividad agrícola	39
2.1 Condiciones físicas derivadas de la localización	39
2.1.1 Relieve	40
2.1.2 Clima	41
2.1.3 Unidad de suelo dominante	45
2.1.4 Hidrografía	47
2.1.5 Uso de suelo y vegetación	52
2.2 Producción agrícola en México	55
2.2.1 Bancos de datos y variables sobre producción agrícola	56
2.2.2 Superficie agrícola cosechada y regiones productoras	58
2.2.3 Superficie agrícola de riego y de temporal	60
2.2.4 Ciclos agrícolas: otoño-invierno y primavera-verano	62
2.2.5 Superficie agrícola siniestrada	64
2.3 Producción agrícola en Zacatecas	66
2.3.1 Cultivos principales	68
2.3.2 Información municipal: superficie cosechada y regiones productoras	70
2.3.3 Superficie agrícola de riego y de temporal	73
2.3.4 Ciclos agrícolas: otoño-invierno y primavera-verano	77
2.3.5 Superficie agrícola siniestrada	79

Capítulo III	Distribución de Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) en Zacatecas y su relación con el porcentaje de superficie agrícola de temporal siniestrada	82
3.1	Desarrollo metodológico	82
3.2	Distribución espacial del SPI en Zacatecas en ciclo primavera-verano, 2011	83
3.2.1	Bases de datos	83
3.2.1.1	Selección de estaciones y periodo de sequía	84
3.2.1.2	Homologación de los datos	85
3.2.1.3	Tratamiento de datos faltantes	86
3.2.3	Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)	88
3.2.4	Interpolación del SPI	90
3.2.4.1	Análisis exploratorio de datos	96
3.2.4.2	Análisis estructural (cálculo y modelado de superficie)	98
3.2.4.3	Predicción de la superficie y valoración de los resultados	99
3.3	Superficie agrícola siniestrada: ciclo primavera-verano, 2011	105
3.3.1	Clasificación municipal por superficie agrícola siniestrada	106
3.3.2	Análisis bivariado para determinar la relación entre superficie sembrada y siniestrada	110
3.4	Relación espacial de SPI con Porcentaje de Superficie Siniestrada en relación con la Sembrada (PSSS) en el ciclo primavera-verano, 2011	116
3.4.1	Delimitación de áreas con agricultura de temporal	117
3.4.2	Reclasificación espacial de los valores de SPI y de Porcentaje de Superficie Siniestrada respecto a la Sembrada (PSSS)	118
3.4.3	Relación espacial de SPI ₉ y PSSS	120
3.4.3.1	Principales resultados referentes a la relación SPI ₉ y PSSS	122
	Conclusiones	126
	Bibliografía	136

Índice

Cuadros y Figuras

CUADROS

Capítulo I

Cuadro 1.1	Clasificación de los riesgos según la naturaleza de su génesis	7
Cuadro 1.2	Ocurrencia de sequía y secuencia de sus efectos	12
Cuadro 1.3	Clasificación de Palmer para los periodos húmedos y secos	20
Cuadro 1.4	Clasificación del SPI según su condición respecto a la media normal	24
Cuadro 1.5	Características y usos de las diferentes escalas temporales del SPI	25

Capítulo II

Cuadro 2.1	Características y actitud agrícola de suelos dominantes en Zacatecas	46-47
Cuadro 2.2	Características de "Grandes presas" en Zacatecas	50
Cuadro 2.3	Fuente de abastecimiento de usos consuntivos (hm ³ /año)	52
Cuadro 2.4	Estructura del "Año agrícola" ejemplificado para tres años "t"	57
Cuadro 2.5	Participación de Zacatecas en la superficie cosechada de la República Mexicana, 2003-2014	67
Cuadro 2.6	Estado de Zacatecas: superficie cosechada y valor de producción para cultivos principales del año agrícola 2014	69
Cuadro 2.7	Estado de Zacatecas: superficie cosechada y valor de producción para cultivos principales del año agrícola 2014	71
Cuadro 2.8	Tipos de agricultura en Zacatecas	74
Cuadro 2.9	Principales municipios por superficie cosechada con riego en Zacatecas, 2014	76
Cuadro 2.10	Principales municipios por porcentaje de superficie cosechada con riego en Zacatecas, 2014	76
Cuadro 2.11	Participación por tipo de cultivo en superficie cosechada de Zacatecas, 2014	77
Cuadro 2.12	Municipios de Zacatecas con mayor participación en el ciclo primavera-verano, 2014	78

Capítulo III

Cuadro 3.1	Distribución de estaciones climáticas seleccionadas	86
Cuadro 3.2	Formato para obtener valores de SPI	89
Cuadro 3.3	Clasificación de métodos de interpolación espacial	91
Cuadro 3.4	Categorías de intensidad de SPI ₉	99
Cuadro 3.5	Estado de Zacatecas: relación entre superficie sembrada y siniestrada en mayores municipios agrícolas, 2011	106

Cuadro 3.6	Estado de Zacatecas: número de municipios clasificados por porcentaje de siniestralidad, 2011	107
Cuadro 3.7	Producción de frijol en municipios afectados por sequía severa pero poca superficie siniestrada respecto a la sembrada	115
Cuadro 3.8	Reclasificación de valor de SPI ₉	118
Cuadro 3.9	Reclasificación de valor de PSSS	118
Cuadro 3.10	Posibles combinaciones y valores resultantes de la relación entre el SPI ₉ y PSSS	120
Cuadro 3.11	Resultados de la relación entre el SPI y PSSS en porcentaje respecto al total de superficie agrícola de temporal	121

FIGURAS

Capítulo I

Figura 1.1	Circulación Generalizada de Walker (diciembre-febrero) durante las condiciones de ENSO-neutral	14
Figura 1.2	Circulación Generalizada de Walker (diciembre-febrero) durante los eventos de El Niño, superpuesta en el mapa de anomalías de temperatura promedio de la superficie del mar	15
Figura 1.3	Circulación Generalizada de Walker (diciembre-febrero), anomalía durante los eventos de La Niña, superpuesta en el mapa de anomalías de temperatura promedio de la superficie del mar	15
Figura 1.4	Clasificación de episodios Niño/Niña según desviación térmica de la superficie del mar	16
Figura 1.5	Índice del Niño Oceánico (INO) 1950 a 2015	17
Figura 1.6	Probabilidad acumulada del SPI	23
Figura 1.7	Probabilidad gamma acumulada del SPI	24
Figura 1.8	Área afectada por sequía en México en el periodo de enero de 2003 a enero de 2014	28
Figura 1.9	Evolución de la sequía por mes en México, 2011	30
Figura 1.10	Índice de Estrés Agrícola, julio 2011	33
Figura 1.11	Esquema metodológico	38

Capítulo II

Figura 2.1	Ubicación de Zacatecas e hipsometría del estado	40
Figura 2.2	Fisiografía	40
Figura 2.3	Distribución de precipitación total anual	42
Figura 2.4	Distribución de temperatura media anual	42
Figura 2.5	Distribución de tipos de climas en Zacatecas	44
Figura 2.6	Unidades de suelo dominantes en Zacatecas	45
Figura 2.7	Hidrografía en Zacatecas	48
Figura 2.8	Disponibilidad de acuíferos	51
Figura 2.9	Usos consuntivos del agua en Zacatecas (hm ³ /año)	51

Figura 2.10	Uso de suelo y vegetación en Zacatecas	53
Figura 2.11	Matorral desértico en el norte de Zacatecas	54
Figura 2.12	Clasificación de entidades federativas por extensión de superficie agrícola cosechada, 2014	59
Figura 2.13	Entidades federativas: superficie agrícola cosechada y disponibilidad de riego, 2014	61
Figura 2.14	Clasificación de entidades federativas por superficie agrícola cosechada del ciclo primavera-verano, 2014	63
Figura 2.15	Superficie siniestrada en ciclo primavera-verano y disponibilidad de riego por entidad federativa, 2011	66
Figura 2.16	Estado de Zacatecas: lugar nacional en superficie cosechada, 2003-2014	68
Figura 2.17	Superficie cosechada de cultivos cíclicos y perennes en tierras con riego y de temporal por entidad federativa, 2014	72
Figura 2.18	Uso agrícola en Zacatecas	73
Figura 2.19	Superficie cosechada y modalidad de tierra de labor en Zacatecas, 2014	75
Figura 2.20	Infraestructura de riego agrícola en Fresnillo	75
Figura 2.21	Estado de Zacatecas: participación municipal en el ciclo primavera-verano por superficie cosechada, 2014	79
Figura 2.22	Estado de Zacatecas: superficie siniestrada municipal y disponibilidad de riego, 2014	81
Capítulo III		
Figura 3.1	Distribución de 48 estaciones climáticas seleccionadas	85
Figura 3.2	Estación 32003: comportamiento de la precipitación pluvial el día uno de enero, 1980-2012	86
Figura 3.3	Distribución del clima y estaciones climáticas seleccionadas	88
Figura 3.4	Unión de valores SPI con estaciones climáticas seleccionadas	89
Figura 3.5	Parámetros de semivariograma	93
Figura 3.6	Modelos teóricos del semivariograma	94
Figura 3.7	Extensión <i>GeostatisticalAnalyst</i>	95
Figura 3.8	Gráficos concernientes al análisis de la exploración de datos: a) histograma de frecuencias, b) probabilidad normal, c y d) análisis de tendencias en las direcciones norte-sur y este-oeste, respectivamente	97
Figura 3.9	Semivariograma empírico de SPI ₉	98
Figura 3.10	Intensidad de SPI ₉ por interpolación IDW	101
Figura 3.11	Intensidad de SPI ₉ por interpolación <i>kriging</i>	103
Figura 3.12	Predicción del error estándar por método <i>kriging</i>	103
Figura 3.13	Comparación de validación cruzada del error en los métodos IDW y <i>kriging</i>	104
Figura 3.14	Estado de Zacatecas: comportamiento de SPI, 1980 a 2012	106

Figura 3.15	Estado de Zacatecas: porcentaje de superficie siniestrada por municipio, 2011 (ciclo: primavera-verano/modalidad: temporal)	110
Figura 3.16	Distribución de casos en ejes X,Y con correlación alta	112
Figura 3.17	Distribución de casos en ejes X,Y con correlación baja	112
Figura 3.18	Estado de Zacatecas: distribución de municipios en ejes X,Y ($r = -0.130$)	113
Figura 3.19	Estado de Zacatecas: distribución municipal a partir del análisis bivariado	115
Figura 3.20	Mapas de SPI ₉ y categorías de PSSS en áreas agrícolas de temporal	118
Figura 3.21	Simplificación de valor de SPI mediante la herramienta <i>Reclassify</i>	119
Figura 3.22	Función local aplicada a las capas <i>raster</i> de entrada SPI y PSSS	120
Figura 3.23	Distribución de sequía extrema	124
Figura 3.24	Relación espacial de SPI y PSSS: sequía severa y poca superficie siniestrada respecto a la sembrada	125

Introducción

A nivel internacional la recurrencia e intensificación de fenómenos hidrometeorológicos es un tema trascendente dentro de las agendas para el desarrollo, ya que los daños ocasionados por tales sucesos alteran el comportamiento normal del sistema social afectado, dejando a su paso costosos desequilibrios económicos y ambientales, así como pérdida de vidas imposibles de subsanar.

Según datos suministrados por la empresa de seguros Munich Re, se estima que solamente en el periodo 1980-2012 el total de las pérdidas económicas declaradas por concepto de desastres por fenómenos naturales ascendió a 3800 billones de dólares, de los cuales el 74 % tuvieron como causa algún evento meteorológico extremo (Banco Mundial, 2013). A su vez estos últimos se han relacionado con el calentamiento del sistema climático terrestre, el cual señala el *Inter Governmental Panel on Climate Change* (IPCC): “[...] es inequívoco y, desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios” (IPCC, 2013).

Debido a sus repercusiones socioeconómicas y medioambientales a largo plazo, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) califica la sequía como el peligro natural más dañino (OMM, 2012:14). Por su parte, el *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* (CRED, 2015) estimó pérdidas económicas por este fenómeno a nivel mundial de aproximadamente 100 mil millones de dólares que afectaron a 1100 millones de personas en el lapso de 1995 y 2015. Sus efectos negativos son evidentes en diversos ámbitos, pero sin duda las actividades agrícolas sobresalen entre las más afectadas por su estrecha dependencia a la disponibilidad de agua. Así, se puede afirmar que la principal amenaza para las zonas agrícolas es la sequía (FAO, 2015).

Dentro del contexto nacional la sequía fue el fenómeno hidrometeorológico que más incidió entre 2005 y 2015, ya que representó 33 % del total de eventos registrados (SAGARPA, 2016). Las consecuencias adversas se centraron principalmente sobre las actividades agropecuarias. En particular, en el 2011 alcanzó un máximo, con magnitud tal que sus efectos permanecieron vigentes hasta bien entrado 2012. Por lo mismo, sus repercusiones fueron significativas en diversos ámbitos. Y, como se mencionó, con especial relevancia dentro del sector agrícola donde la falta de agua produjo pérdidas económicas superiores a 16 mil millones de pesos (Ortega y Velasco, 2013).

Los estados que más sufrieron por la carencia de agua están localizados en la región norte del país, como fue el caso de Chihuahua, Coahuila, Zacatecas, Durango y San Luis Potosí. De acuerdo con reportes de la SAGARPA (*op. cit.*) Zacatecas fue el más afectado. Este hecho resultó trascendente para la economía nacional y local y, de la misma manera, representó una situación muy difícil en lo social por el hecho de la importancia agrícola de esa entidad, al aportar los mayores volúmenes de la producción nacional de frijol en las últimas décadas.

Como se sabe, este grano es el segundo más importante para la alimentación de los mexicanos después del maíz, motivo por el cual el análisis de las repercusiones de la sequía en la actividad agrícola resulta relevante. Se asume que un estudio detallado de este fenómeno dentro de la entidad puede ayudar a dimensionar los efectos adversos y a visualizar si resultaron eficaces las prácticas de cultivo y de prevención empleadas por los agricultores, así como aquellas impulsadas por las autoridades, para perder lo menos posible de las cosechas frente a un episodio de sequía.

En este sentido es conveniente destacar que la ubicación geográfica de Zacatecas le confiere características climáticas áridas y semiáridas en la mayor parte de su territorio, por lo que los episodios de escasez de precipitación tienden a ser recurrentes, perjudicando especialmente los cultivos de temporal. Es posible inferir que al tratarse de áreas agrícolas altamente productivas deberían contar con medidas estructurales (y no estructurales) ante la alta probabilidad de enfrentar bajas significativas en los volúmenes de precipitación pluvial recibida.

Si bien los estudios geográficos logran identificar zonas altamente vulnerables, también es posible referir espacialmente cuales son las menos afectadas ante un evento de sequía como el ocurrido en 2011.

Bajo estos supuestos se postuló la siguiente hipótesis:

Ante la sequía registrada en el estado de Zacatecas en 2011, la superficie siniestrada correspondiente a tierras de temporal durante el ciclo primavera-verano fue inferior a lo esperado ante la magnitud que alcanzó el evento climático.

Para comprobar dicha hipótesis se consideró un objetivo general y seis particulares, los cuales se detallan a continuación:

Objetivo general:

Demostrar que la relación espacial de intensidad de sequía en 2011 no fue proporcional al porcentaje de superficie siniestrada en la agricultura de temporal, durante el ciclo primavera-verano, en el territorio estatal de Zacatecas.

Objetivos particulares:

1. Conocer las características de las sequías y sus posibles causas de ocurrencia, así como revisar los métodos para medirla.
2. Determinar su impacto en la agricultura nacional.
3. Desarrollar una metodología que dimensione la relación espacial entre la sequía y la superficie siniestrada.
4. Reconocer las características agrícolas en Zacatecas e identificar las áreas dedicadas a la agricultura de temporal de mayor importancia.
5. Ubicar y diferenciar las distintas magnitudes de sequía que afectaron esta entidad federativa en 2011 durante el ciclo agrícola primavera-verano.
6. Relacionar la intensidad de sequía con el porcentaje de superficie agrícola de temporal siniestrada durante el ciclo primavera-verano de 2011.

Para alcanzar tanto el objetivo general como los particulares, y comprobar la validez del supuesto hipotético planteado aquí, se desarrollaron tres capítulos. En el primero se enmarca la importancia de la intensificación de los fenómenos hidrometeorológicos extremos, para luego precisar el concepto y las principales características de la sequía. Dentro de estos contenidos se consideró conveniente profundizar en la posible relación entre la presencia del fenómeno referido y el evento de “El Niño-Oscilación del Sur” (ENSO). Enseguida se describen los índices más utilizados para representar y dimensionar un evento de sequía y detallar los efectos que causó la escasez de lluvia en México durante el periodo 2011-2012; asimismo se revisaron algunas de las medidas preventivas a nivel local en torno a su mitigación. Finalmente se plantean y explican algunas técnicas y metodologías mediante las cuales se puede evidenciar la relación espacial entre sequía y superficie agrícola siniestrada. Estos análisis son el preámbulo para construir el procedimiento analítico que orientó la presente investigación con el cual cierra esta primera parte de la investigación a manera de propuesta metodológica.

En el segundo capítulo se consideran las características físicas del estado de Zacatecas, ya que la identificación de elementos como relieve, clima e hidrología son trascendentales en el contexto de la sequía, pero también es necesaria para explicar la capacidad agrícola de esa entidad federativa. Luego de lo anterior se explican diversas particularidades de la

agricultura nacional, así como de las principales áreas de cultivo en el país, a partir de las cuales se identifica al estado como el mayor productor nacional de frijol. De manera adicional se pondera la trascendencia del temporal, con énfasis en el ciclo agrícola primavera-verano, al ser el que más aporta a la producción. Por último, se identifican las regiones dentro de la entidad con mayor superficie siniestrada en un año agrícola promedio.

En el tercer capítulo se aplica y desarrolla la metodología planteada dentro del primero. Con ello fue posible determinar el grado de asociación encontrado entre intensidad de sequía y la superficie siniestrada. El primer paso consistió en conocer la distribución del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), para ello fue necesario seleccionar las estaciones climáticas dentro del estado que contaran con datos de 1980 a 2012 y además que estos cubrieran al menos 80 % del total de los registros. En este sentido, para poder realizar el índice era necesario tener los registros por mes completos, por lo cual fue necesario establecer un proceso de rellenado de datos faltantes. Después de tener las bases de información completas se determinó que la escala temporal del SPI sería la de nueve meses (SPI₉) debido a que ésta cubre todo el ciclo agrícola primavera-verano. En el siguiente apartado del capítulo se continuó con el procedimiento estadístico, el cual contempló aplicar la técnica de interpolación aprovechando las utilerías con las que cuenta el Sistema de Información Geográfica (SIG) utilizado en este trabajo, permitiendo visualizar espacialmente las diferentes magnitudes de sequía durante el ciclo agrícola primavera-verano en las diversas zonas agrícolas de Zacatecas. A continuación, se examinó la superficie siniestrada de temporal al tiempo que se analizó su distribución geográfica, calculando tanto la superficie siniestrada total como el porcentaje de superficie siniestrada respecto al total sembrado. El capítulo termina explicando la metodología empleada para establecer la relación espacial entre las diferentes magnitudes de sequía, representadas por el SPI₉ (durante el ciclo agrícola primavera-verano), con el Porcentaje de Superficie Siniestrada respecto a la Sembrada (PSSS).

Finalmente, en la última sección, dedicada a las conclusiones, se representan los aspectos más relevantes derivados de los seis objetivos particulares, concentrados en los capítulos ya descritos. Esto con el objetivo de crear un preámbulo que apoye el porqué del comportamiento espacial de la relación espacial entre SPI₉ y el PSSS. También se puntualizan los resultados obtenidos de la metodología implementada y se confrontan con la hipótesis que sustenta esta investigación. Lo anterior con la finalidad de reconocer hasta qué punto se cumplió el supuesto hipotético. Adicionalmente se consideró el trabajo en campo, el cual enriqueció y validó significativamente las consideraciones finales.

Capítulo I

La sequía como fenómeno hidrometeorológico y sus efectos sobre la actividad agrícola en México

Los efectos de la sequía repercuten de manera adversa en diversos ámbitos. En particular, dentro del contexto tanto mundial como nacional, se sabe que la agricultura es una de las actividades más afectadas debido a la estrecha relación existente entre agricultura y lluvias escasas. Sin embargo, al ser un evento recurrente en México es posible que se haya creado cierta capacidad para enfrentarla, ya sea mediante estrategias aplicadas por los agricultores o a partir de programas de prevención establecidos por las autoridades responsables en cualquiera de los tres niveles de gobierno.

Para entender y dimensionar la asociación entre sequía y agro, en los siguientes apartados se procuró explicar un fenómeno tan complejo como el de la sequía. Para este último fin se requerirá de un análisis cuidadoso de los parámetros que mejor la definen; así, en la primera parte de este capítulo se busca conceptualizarla, además se detallan los índices más usuales para cuantificarla. Después de lo anterior se desarrollan diversas generalidades de la agricultura mexicana y, finalmente, se revisan diversas metodologías empleadas para relacionar sequía y pérdidas agrícolas. Lo anterior para consolidar el procedimiento a seguir y con ello corroborar o desmentir la hipótesis planteada.

1.1 Fenómenos hidrometeorológicos extremos

En términos del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), en las últimas décadas, los cambios en el clima terrestre han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y en todos los océanos (IPCC, 2014: 4); sin embargo, es importante señalar que la percepción de esos efectos es distinta según la intensidad que alcancen las condiciones del territorio y la capacidad de la población para enfrentarlos.

Bajo esa tesitura, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2015) advierte que el aumento de los desastres relacionados con el cambio climático es una amenaza creciente para la seguridad alimentaria. Por su parte, Landa (*et al.*, 2008) afirma que los desastres de origen hidrometeorológicos son los más frecuentes y causan más daños en todo el mundo; además de afectar los bienes e integridad física de las personas en

una compleja cadena de impactos que repercute prácticamente en todas las dimensiones del desarrollo humano.

En este sentido, la Oficina de Naciones Unidas para la Reducción de Riesgo de Desastres (UNISDR, 2015) calcula que en el periodo 1990 a 2013, en América Latina y el Caribe, las pérdidas y daños ocasionados por fenómenos hidrometeorológicos se relacionan con sus manifestaciones, tanto intensivas (61 %) como extensivas (97 %)¹. Por su parte, la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2012) plantea la probabilidad de que la escasez de agua y las inundaciones se intensifiquen a raíz del cambio climático², pues en un planeta en el que las temperaturas están aumentando se reforzará la dinámica de los procesos hidrológicos y atmosféricos provocando eventos extremos, con mayor número de sequías, por una parte, así como precipitaciones de gran intensidad.

Conforme con lo anterior, las actividades que mantengan una relación más estrecha con las condiciones climáticas serán más propensas a verse afectadas de forma directa, tal es el caso del sector agropecuario.

En este sentido, la Geografía es una de las disciplinas que han participado en el análisis espacial del impacto de fenómenos de carácter hidrometeorológico. Un número importante de dichos estudios está vinculado con el riesgo, el cual “[...] hace referencia a la probabilidad de que [si] a una población (personas, estructuras físicas, sistemas productivos, etc.), o segmento de la misma, le ocurre algo nocivo o dañino [...] es indiscutible que el grado de riesgo siempre está en función de la magnitud de la amenaza y de la vulnerabilidad [...]” (Lavell, 1996:20). Por lo tanto:

Riesgo = amenaza x vulnerabilidad

Los riesgos pueden clasificarse desde distintos puntos de vista, ya sea a partir de sus causas, sus características o efectos. Martínez (2014) los segmenta según la naturaleza de su génesis como se aprecia en el Cuadro 1.1.

¹Conforme con la UNISDR (2015: 6) “[...] se consideran Intensivos cuando en una unidad político administrativa local hubo 25 o más vidas humanas perdidas y/o 300 o más viviendas destruidas. Se denominan Extensivos los registros cuyos valores son inferiores a esos umbrales”.

²El IPCC (2014: 5) refiere el cambio climático como “[...] el estado del clima que puede ser identificado (por ejemplo, mediante el uso de pruebas estadísticas) por los cambios en la media y/o la variabilidad de sus propiedades y que persiste durante un periodo prolongado, típicamente décadas o más. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o forzamientos externos, tales como las modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas y los cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o en el uso del suelo”.

Si bien el estudio del fenómeno en sí resulta trascendental, “[...] en los últimos años la preocupación se ha ido desplazando hacia las comunidades que sufren los daños” (Vargas, 2002); además, se buscan reforzar medidas para disminuir la vulnerabilidad y hacer al sistema capaz de enfrentar y sobreponerse a los daños, para así aumentar su capacidad de resiliencia³ y, por ende, asegurar su continuidad.

Cuadro 1.1 Clasificación de los riesgos según la naturaleza de su génesis

1	Geofísicos (Riesgos naturales)	1.1	Meteorológicos/ Climáticos	1.1.1	Sequía
				1.1.2	Tormentas, rayos, granizo
				1.1.3	Olas de frío, heladas
				1.1.4	Olas de calor, calima, incendios
				1.1.5	Fenómenos ventosos
				1.1.6	Niebla
				1.1.7	Erosión y desertificación
		1.2	Geológicos	1.2.1	Sísmico
				1.2.2	Volcánico
		1.3	Geomorfológicos	1.3.1	Movimientos <i>in situ</i>
				1.3.2	Desplazamientos
		1.4	Hidrológicos	1.4.1	Desbordamientos (inundaciones)
		2	Biológicos	2.1	Plagas
2.2	Bacterias y virus				
3	Antrópico-contaminantes	3.1	Atmosférico		
		3.2	Hídrica		
		3.3	Superficial		

Fuente: Martínez (2014: 4)

³La habilidad de un sistema y sus componentes para anticipar, absorber, adaptarse o recuperarse de los efectos de un fenómeno peligroso, de forma oportuna y eficiente, incluso velando por la conservación, restauración o mejora de sus estructuras y funciones básicas esenciales (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, IPCC, 2012: 4).

En este contexto, “[...] para atenuar las consecuencias devastadoras, algunas organizaciones científicas y agencias estatales han incorporado las tecnologías de información existentes como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la percepción remota en la mitigación⁴ de los desastres naturales” (Álvarez, 2005: 1). Adicionalmente, el desarrollo de la tecnología espacial e innovación en *software* especializados en información geográfica dan mayores posibilidades y herramientas técnicas para el adecuado estudio de estos eventos. Sin duda, la declaración del Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales (1990-1999) contribuyó a la realización de innumerables investigaciones sobre la cuestión. En este marco, los trabajos destinados a la cartografía de los riesgos han jugado un destacado papel (Díaz y Díaz, 2002).

Como ejemplo de la importancia nacional que se le da a la representación cartográfica, tanto el Atlas Nacional de Riesgos como el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático constituyen un marco de referencia para la construcción de políticas a nivel nacional para enfrentar el cambio climático. En este sentido, fenómenos como sequías e inundaciones tienen un papel relevante debido a los marcados efectos negativos que dejan a su paso a lo largo del territorio nacional. De igual manera, dentro del Atlas agroclimático de la República Mexicana es posible reconocer la relevancia e impacto de estos fenómenos hidrometeorológicos en torno a la agricultura nacional.

Así, la vulnerabilidad entendida “[...] como un factor de riesgo interno de un sujeto o sistema expuesto a una amenaza, que correspondiente a su predisposición intrínseca a ser afectado o de ser susceptible a sufrir daño” (Cardona, 2001: 11), ha sido, en los últimos años dentro de la Geografía, un elemento muy estudiado, ya que al conocer las áreas más susceptibles de ocurrencia ha sido posible dirigir esfuerzos para disminuir su fragilidad.

Es verdad que las condiciones locales de vulnerabilidad ubican espacialmente los lugares más propensos a verse afectados y esta identificación es trascendente; sin embargo, también es posible distinguir los espacios mejor adaptados a fenómenos hidrometeorológicos extremos. En este sentido será posible conocer las estrategias tanto institucionales como empíricas que han conformado tal hecho. Además, será posible poner en marcha estas acciones en lugares que cuenten con características similares y, con ello, aportar elementos para reducir el riesgo ante tales eventos.

⁴En el ámbito de los riesgos naturales, las medidas de mitigación suelen definirse como las medidas adoptadas antes de una sequía para disminuir sus efectos cuando ésta se produzca (Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Asociación Mundial para el Agua (2014: 4).

1.1.1 Concepto de sequía y características principales

La FAO (*op. cit.*: 2) considera que "[...] la principal amenaza para las zonas agrícolas es la sequía"; debido a sus repercusiones socioeconómicas y medioambientales a largo plazo es el peligro natural más dañino (OMM, 2012: 14). Además, "[...] desde mediados del siglo veinte, la aridez y las zonas de sequía se han incrementado sustancialmente a nivel mundial" (Dai, 2011: 59). En el caso particular de la agricultura tienen un impacto económico inmediato capaz de reducir y hasta arruinar la producción, lo que afecta de forma negativa los precios de los productos agrícolas, el comercio de estos y su acceso al mercado, disminuyendo los ingresos y el empleo en distintos ámbitos espaciales.

Las sequías han sido documentadas históricamente no solamente por su influencia en la pérdida de cultivos; Florescano (2000) relaciona el incremento de precios del maíz (consecuencia de este fenómeno) con el descontento social generalizado que alimentó movimientos armados en México, como fueron la rebelión de Hidalgo en 1810 y la Revolución de 1910.

Las definiciones y enfoques de trabajo relacionados con la sequía son variadas y hacen referencia al ambiente en el cual se llevan a cabo. Así el *National Drought Mitigation Center* (NDMC, 2016) la define en los siguientes términos:

Fenómeno progresivo que genera una deficiencia de precipitación durante un periodo prolongado de tiempo –por lo general una estación o más– que resulta en una escasez de agua para alguna actividad, grupo o sector del medio ambiente.

Mientras que el *National Weather Service* (NWS, 2006: 1) indica:

La sequía es una deficiencia en la precipitación sobre un periodo prolongado, por lo general de una estación o más, lo que resulta en una escasez de agua causando impactos adversos sobre la vegetación, los animales y/o personas. Es una característica normal y recurrente del clima que se da en prácticamente todas las zonas climáticas, incluyendo las húmedas.

Landa (*op. cit.*, 2008: 17) la conceptualiza como:

La deficiencia en la precipitación sobre un periodo amplio de tiempo, que puede entenderse como una propiedad normal y recurrente del clima, cuyo impacto proviene de la interrelación entre el evento natural y la demanda en el suministro de agua.

Se debe tener en cuenta que la sequía y aridez no son sinónimos, ya que la aridez es una característica permanente del clima, puesto que la nula o baja precipitación por largos periodos en ambientes desérticos es común.

Adicionalmente Zargar (*et al.*, 2011) menciona que este fenómeno se caracteriza por los siguientes elementos:

- Duración. Según la región, la duración de la sequía puede variar entre una semana y algunos años.
- Magnitud. El déficit acumulado de agua (por ejemplo: precipitación, humedad del suelo o escurrimiento) por debajo de cierto umbral durante el periodo de sequía.
- Intensidad. Relación entre la magnitud de la sequía y su duración.
- Severidad. Se puede considerar como el grado del déficit de precipitación (es decir, magnitud) o el grado de impactos resultante del déficit.
- Extensión geográfica. La cobertura aérea de la sequía que es variable durante el evento.
- Frecuencia (periodo de retorno). Tiempo medio entre sequías que tienen una gravedad igual o mayor que un umbral.

Los efectos de la sequía se consideran devastadores dependiendo de la intensidad y el daño que generen a la población afectada. Por ello, además de contemplarse una definición conceptual también se cuenta con una operacional, la cual aplica principalmente para los actores políticos y los planificadores encargados de decidir cómo afrontar y mitigar este tipo de daños.

Para determinar el inicio de la sequía, las definiciones operacionales especifican el grado de desviación de la media de precipitación o alguna otra variable climática durante algún periodo. Esto normalmente se hace mediante la comparación de la situación actual contra la media histórica, a menudo sobre la base de un lapso que abarque 30 años, por lo menos, de registros (NDMC, *op. cit.*). Las especificaciones van a complementarse y diferir según el ámbito de estudio; por ejemplo, en la agricultura se consideran las necesidades del cultivo, el crecimiento y el rendimiento. Por su parte, en áreas urbanas preferentemente se relacionará con los efectos adversos en el desarrollo de actividades económicas o en la salud de los habitantes.

1.1.1.1 Tipos de sequía

La relación de la sequía con las diferentes actividades humanas hace que tome un significado específico según intereses y percepción individual. No obstante, los enfoques predominantes en la literatura reconocen cuatro tipos: meteorológica, agrícola, hidrológica y socio-económica (Wilhite y Glantz, 1985).

Sequía meteorológica. Se considera así cuando existen valores de precipitación inferiores a la normal en un periodo determinado; esta dependerá del área a la que se haga referencia. A nivel nacional, la región Golfo y sureste cuentan con un clima húmedo con precipitaciones significativas prácticamente durante todo el año; en este contexto, se tendría sequía de presentarse cierta ausencia de lluvia unos pocos días. Mientras que en regiones con menor abundancia (por ejemplo, la región centro caracterizada por un clima templado con lluvias en verano) el déficit se consideraría a partir del régimen de precipitación respectiva.

Sequía agrícola. Además del déficit de precipitación para esta categoría se consideran parámetros varios, como la diferencia entre la evapotranspiración real y la potencial, déficit hídrico del suelo, reducción en los volúmenes de aguas subterráneas o los niveles de los embalses. Los factores anteriores van a incidir en el desarrollo del cultivo cuando alguna de las etapas fenológicas se afectó, lo cual da como resultado una disminución en la cosecha final o una calidad inferior a la estimada.

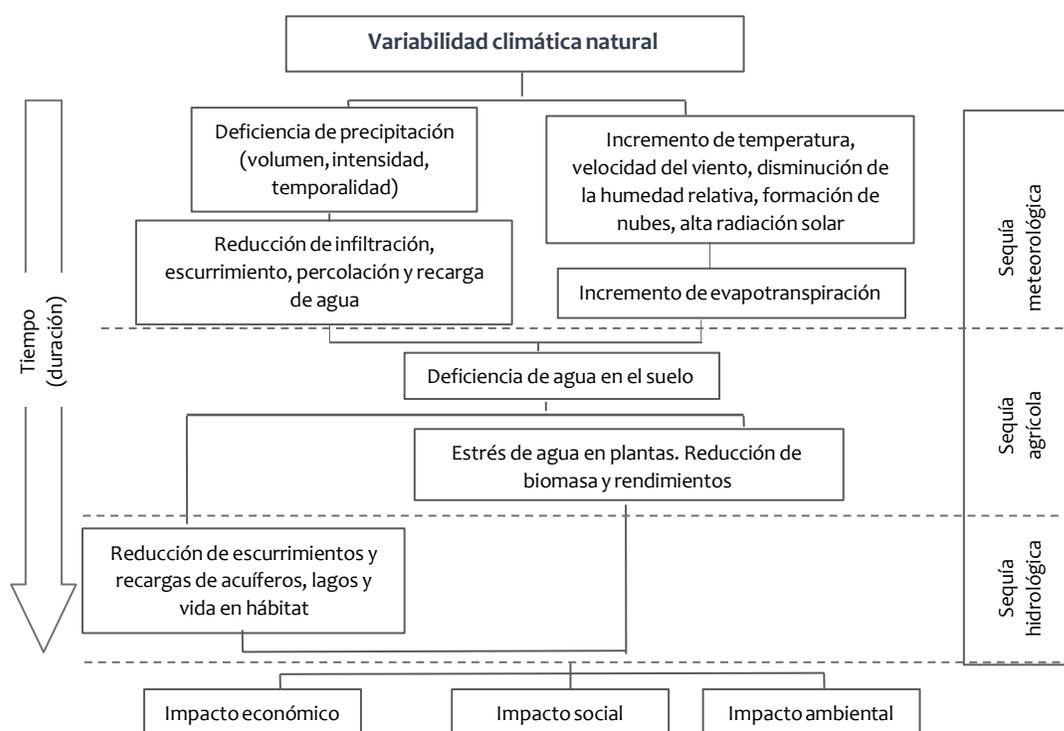
Sequía hidrológica. Se desarrolla de manera más gradual que las dos anteriores, puesto que reduce el caudal de ríos y depósitos de agua en acuíferos, lagos o embalses por debajo de los niveles medios. Al ocurrir este tipo de evento los sistemas no se reponen y, además, provoca su sobre-explotación al intentar satisfacer las necesidades locales.

Sequía socio-económica. Los daños aquí se refieren directamente a sus efectos adversos sobre la población, ya sea en su economía, en otros aspectos de su vida cotidiana o ambos. Dentro del ámbito económico se hacen evidentes problemas como la carestía de productos del campo y el aumento de precios, asociados a poca oferta y alta demanda. Todas estas repercusiones son resultado de un déficit en el suministro de agua. De manera similar, los impactos sociales se relacionan principalmente con las dificultades de conseguirla; por lo general los sectores menos favorecidos sufren en mayor medida, al extremo de verse obligados a acarrear agua desde alguna fuente hasta sus hogares. De igual manera se llegan a enfrentar problemas ante las condiciones insalubres provocadas por la carencia de este líquido.

En los párrafos anteriores se explicaron los tipos de sequía más reconocidos en el ámbito climatológico; sin embargo, en años recientes el *National Drought Mitigation Center* (2016) incorporó una categoría adicional, la cual se explica a continuación.

Sequía ecológica. Se define como un déficit extendido y prolongado en el suministro de agua disponible en el lugar; incluyendo cambios en la hidrología, natural o dirigida, capaz de generar múltiples tensiones sobre los ecosistemas.

Cuadro 1.2 Ocurrencia de sequía y secuencia de sus efectos



Fuente: *National Drought Mitigation Center*, 2016

A manera de resumen, el Cuadro 1.2 esquematiza la secuencia lógica por duración del fenómeno. Así, la sequía meteorológica parte de un déficit en la precipitación y, conforme éste continúa, da lugar a la sequía agrícola seguida por la hídrica. Todas ellas impactarán en el ámbito social, económico y ambiental.

1.1.1.2 El fenómeno de El Niño y La Niña; su relación con las sequías

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2002) relaciona la ocurrencia de una sequía con diversos elementos: cambios en la presión atmosférica; alteraciones en la circulación general (variaciones de los vientos a escala planetaria); modificaciones en la cantidad de luz solar reflejada por la superficie de la Tierra; variaciones de temperatura en océanos e incremento en las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera.

Autores como Arsentiev, *et al.* (2013), y Buendía Carrera (2013; citado en Flores, 2013) asocian el incremento de las temperaturas a la cantidad de manchas solares; ellos tienen en cuenta que el Sol es la fuente de calor más importante para la Tierra y, en consecuencia, uno de los factores que ha incidido en el clima terrestre.

Sin embargo, en la mayoría de las investigaciones el evento con el que más se vincula una sequía es El Niño. Este concepto hace referencia a un fenómeno climático de gran escala que vincula interacciones océano-atmósfera y se ve reflejado en un aumento de la temperatura de la superficie marina del Pacífico ecuatorial, sobre un área centrada en la longitud 120° oeste, aproximadamente (*Climate Prediction Center*, 2015). El nombre lo acuñaron los pescadores peruanos luego de observar la presencia de esta anomalía en fechas cercanas a la Navidad; de ahí su nombre, vinculado al nacimiento del Niño Jesús.

Tal y como lo señala la FAO (*op. cit.*), pese a que sus manifestaciones son periódicas y recurrentes, El Niño no tiene una tendencia determinada, ni lapsos fijos de ocurrencia o intensidad constante. Sin embargo, esa Organización lo relaciona con la Oscilación del Sur, la cual es una disminución de la presión atmosférica entre el Pacífico tropical oriental y el occidental, capaz de provocar variaciones climáticas a escala global. Puede dimensionarse a partir del Índice de Oscilación del Sur (IOS).

Esta combinación de eventos se conoce como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). El Niño es el componente oceánico mientras que la Oscilación Sur es el atmosférico. Sin embargo, no existe una correlación perfecta ya que existen variaciones, aunque son de mínima magnitud. Por ende, valores altos y negativos del IOS pueden asociarse con las fases calientes del fenómeno (FAO, *op. cit.*: 1). En este contexto la fase contraria, La Niña, se refiere al enfriamiento periódico de las temperaturas de la superficie oceánica en el este del Pacífico ecuatorial. Representa la fase fría del ciclo ENOS, donde se acepta en ocasiones como un episodio “frío” del Pacífico.

Ante las anomalías que representan los dos eventos anteriores, el patrón de ENOS en el Pacífico tropical puede estar en uno de tres estados: El Niño, neutral o La Niña, El Niño (la fase de calentamiento) y La Niña (la fase de enfriamiento). Cada uno provoca diferencias

significativas tanto en las temperaturas medias del océano como en los vientos, en la presión superficial y la caída de precipitación en algunas partes del Pacífico tropical.

Según la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés), la condición neutral (Figura 1.1) indica condiciones cercanas al promedio, sin presencia significativa de los otros dos eventos (NOAA, 2016).

Bajo estos antecedentes, la Figura 1.2 ilustra que durante El Niño los vientos alisios ecuatoriales disminuyen, dando lugar a que la piscina de agua caliente del Pacífico permanezca sobre el este (*Ibid*). Así, el movimiento ascendente del aire (vinculado a las precipitaciones) será superior a la normal en esa ubicación.

De manera relacionada entre sí, se tienen dos consecuencias de los procesos anteriores:

1. En el este (Perú y Ecuador) la precipitación mostrará tendencia a aumentar al mantenerse en sus cercanías el agua oceánica más cálida.
2. En el Oeste (Indonesia y Australia) la precipitación estará por abajo de lo normal ante la presencia de corrientes frías al no llegar a sus costas el flujo normal de agua caliente procedente del este.

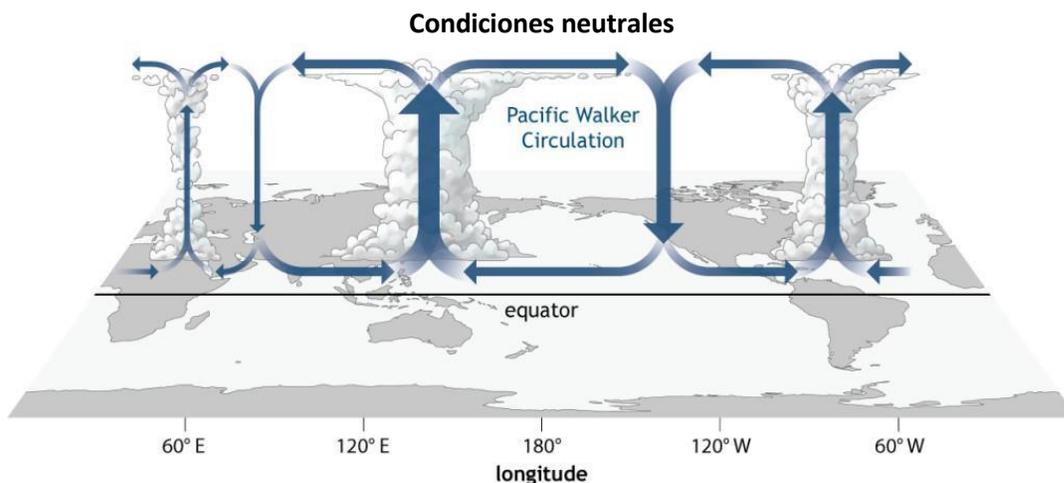


Figura 1.1 Circulación Generalizada de Walker (diciembre-febrero) durante las condiciones de ENSO-neutral. La convección asociada con el aumento de las ramas de la circulación de Walker se encuentra sobre el norte de América del Sur y África Oriental

Fuente: NOAA, 2016

Condiciones durante El Niño

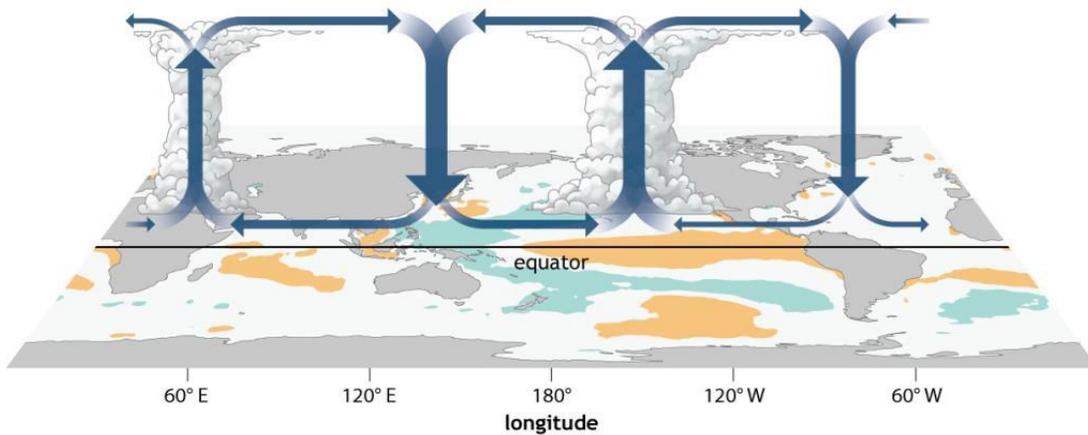


Figura 1.2 Circulación Generalizada de Walker (diciembre-febrero) durante los eventos de El Niño, superpuesta en el mapa de anomalías de temperatura promedio de la superficie del mar. Las condiciones atípicas en el calentamiento del océano se localizan en el centro y este del Pacífico (naranja) donde se generan movimientos ascendentes a causa de la presencia de aguas cálidas

Fuente: NOAA, 2016

Condiciones durante La Niña

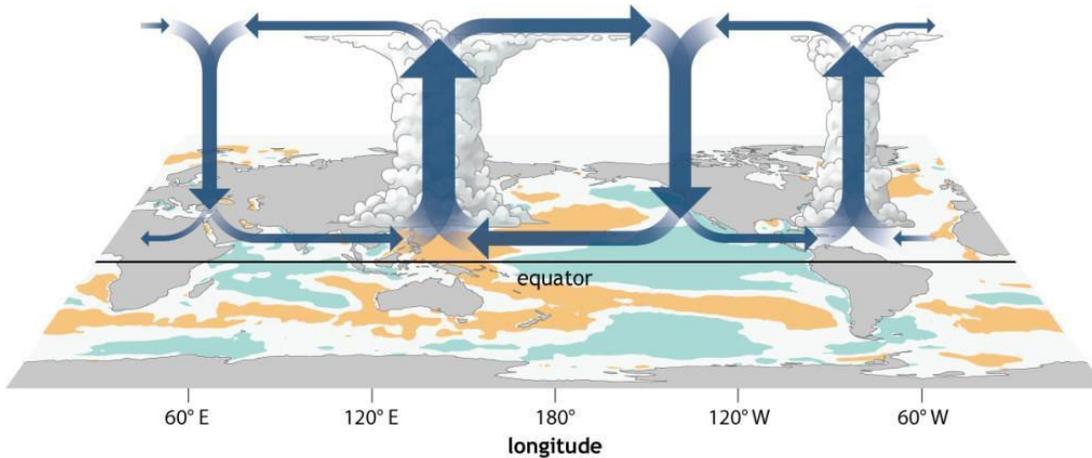


Figura 1.3 Circulación Generalizada de Walker (diciembre-febrero), anomalía durante los eventos de La Niña superpuesta en el mapa de anomalías de temperatura promedio de la superficie del mar. Se aprecia un enfriamiento anormal (azul-verde) en el Océano Pacífico central y oriental y un calentamiento sobre el Pacífico occidental que aumenta la rama ascendente de la circulación de Walker, mientras la rama descendente se encuentra en el Pacífico oriental. Otro movimiento ascendente importante se observa sobre el norte de América del Sur, mientras que el movimiento anómalo de hundimiento se encuentra sobre el este de África

Fuente: NOAA, 2016

Por el contrario, durante La Niña los vientos de superficie a través de todo el Pacífico tropical son más fuertes de lo normal, desplazando el agua cálida hacia el oeste y generando en la porción este una temperatura inferior al promedio. De manera equivalente a lo que ocurre con El Niño, en esta circunstancia se tendrán dos consecuencias fundamentales (Figura 1.3):

1. Sobre las aguas más frías del Pacífico central y oriental se incrementa el movimiento descendente del aire a lo largo del Pacífico tropical central, condición que provoca menor volumen de lluvias sobre Perú y Ecuador.
2. Al llegar corrientes con aguas cálidas se genera movimiento ascendente del aire y baja presión en la superficie del océano, por lo cual las lluvias aumentan en el Oeste, sobre Indonesia y Australia.

Para identificar episodios de El Niño (fase caliente) y La Niña (fase fría), la NOAA (2015) utiliza el Índice Oceánico de El Niño (INO). El INO identifica las anomalías en la temperatura de la superficie del mar dentro de la región comprendida entre las latitudes 5° N-5° S y longitudes 120°-170° W con base en una media histórica de 30 años. De manera que cuando ese referente registra una desviación respecto al promedio respectivo, ya sea positiva (fase caliente) o negativa (fase fría) durante tres meses consecutivos, se reconoce un evento de esta naturaleza.

Para la mejor comprensión de la escala de dispersiones a las que se hace referencia, se presenta la Figura 1.4 con los rangos de clasificación que sirven para caracterizar cada una de las categorías respectivas.

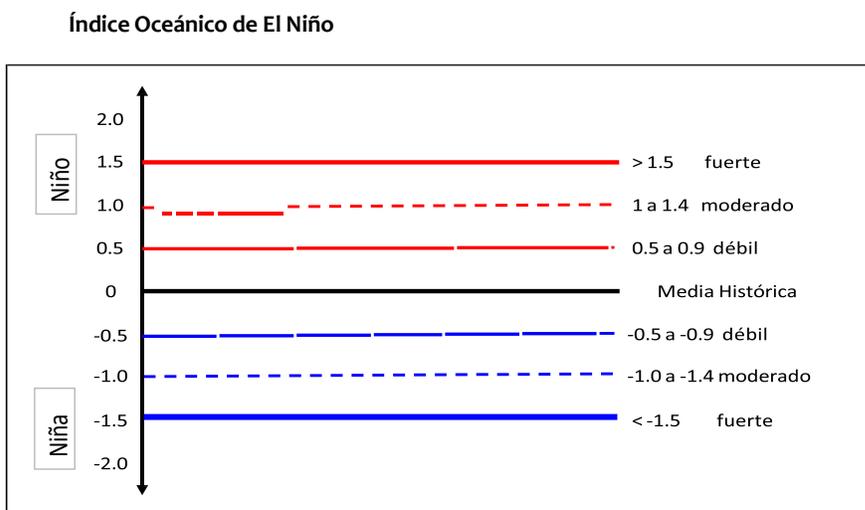


Figura 1.4 Clasificación de episodios Niño/Niña según desviación térmica de la superficie del mar

Fuente: NOAA, 2015

La Figura 1.5 es útil para apreciar cómo, en el periodo de 1950 a 2015, los eventos con mayor intensidad de El Niño ocurrieron en 1982-83 y 1997-98 superando en ambos casos un valor INO de +2.0, mientras que La Niña alcanzó sus mayores dimensiones entre 1973-74 y 1988-89, tiempos donde cayó por abajo de -1.5.

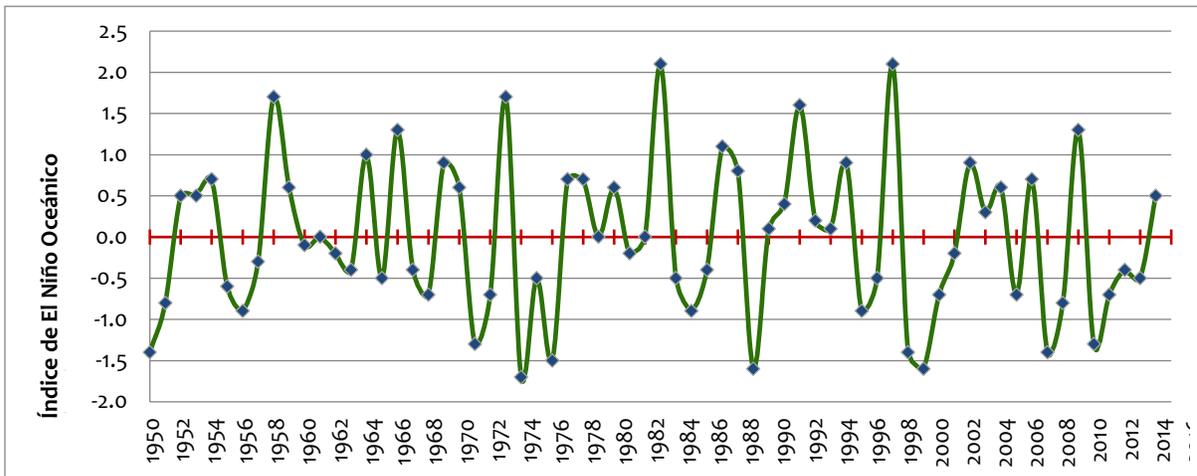


Figura 1.5 Índice de El Niño Oceánico (INO) 1950 a 2015

Fuente: NOAA, 2015

1.1.1.3 El Niño, La Niña y sus efectos en la República Mexicana

De acuerdo con la FAO (2015: III), "[...] durante los episodios de El Niño los patrones habituales de la circulación atmosférica (en lo general) y de las precipitaciones (en particular) se ven alterados, desencadenando episodios climáticos extremos en distintos lugares del planeta. Uno de los más trascendentales por sus efectos adversos es la ocurrencia de sequías".

Como se sabe, debido a su alta dependencia de la lluvia, la agricultura destaca entre los sectores de la economía con alta probabilidad de sufrir afectaciones severas ante una reducción significativa en el volumen normal de lluvias. Cifras oficiales indican que 70 % del consumo mundial de agua corresponde a la agricultura, mientras que en México se calcula que 78 % de la extracción de agua se emplea en esa actividad, seguida de lejos por el uso humano, el cual involucra otro 12 % del total (Colegio de Posgraduados, COLPOS, 2012).

En este ámbito, Magaña (2004) explica que los efectos de El Niño deben diferenciarse para dos épocas: la invernal y de verano. Así, en la primera se generarán lluvias y fríos anómalos en el norte de México debido a la mayor entrada de vientos procedentes de latitudes medias y frentes fríos por causa de una alteración en la circulación general sobre América del Norte. En contraste, durante el verano el evento provoca disminución de lluvias en la mayor parte del país y llega con frecuencia a convertirse en sequías. Para esa época del año la Zona Intertropical de Convergencia, donde existe gran cantidad de nubes profundas y alto potencial de lluvia, tiende a permanecer más cercana al Ecuador, por lo que esa fuente básica de humedad (entre junio y agosto) permanece alejada de la costa oeste de México, ocasionando lluvias de menor cuantía. "De esta forma, el ciclo agrícola primavera-verano se verá afectado" (Conde *et al.*, 2004: 103).

Conviene referir a Conde (*op. cit.*: 114) cuando lleva a cabo una comparación de los efectos de El Niño en relación con la superficie agrícola siniestrada, considerando los años 1991 y 1997. De la cual expresa que "[...] en el primero las pérdidas superaron 40 % afectando a cinco entidades federativas; mientras que en el segundo año hubo decrementos hasta del 50 % en el doble de casos estatales".

Por su parte, Delgadillo *et al.* (2004: 195) expresa que "[...] los efectos de El Niño en la agricultura nacional se tradujeron en disminuciones de 30 % en las cosechas. De manera específica, entre 1997 y 1998 refiere la pérdida aproximada de 3.5 millones de toneladas de maíz. Para el caso del frijol se cosechó solamente la mitad de lo previsto, con una pérdida monetaria cercana a los cinco mil millones de pesos".

A pesar de estas aportaciones, no ha sido posible compaginar todas las sequías con el fenómeno de El Niño. Como ejemplo de ello, en la sequía de 2011-2012 que afectó el territorio nacional no se reconoce tal vínculo. En este sentido los registros de NOA apuntan a un Niña con intensidad de moderada a severa.

1.1.2 Métodos usados para dimensionar eventos de sequía

De ocurrir una sequía, la severidad de la misma no sólo dependerá de su duración, intensidad y ubicación geográfica; también estará asociada con las necesidades presentadas por las actividades humanas. De esa relación se establecerá el grado de dependencia existente. Las características de la sequía, así como sus repercusiones, hacen difícil dimensionar y cuantificar sus efectos sobre la sociedad, la economía y el medio ambiente, aunque no imposible (Wilhite, 2000: 7).

Para representar y dimensionar esas condiciones de forma cuantitativa se han diseñado índices numéricos, fundamentados en información climática, todos ellos pretenden reflejar cambios específicos en el comportamiento del fenómeno. Estos índices son una herramienta trascendente en cuestión de toma de decisiones y aplicación de políticas públicas.

Entre estos referentes los más empleados son el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) (Palmer, 1965); el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) (McKee *et al.*, 1993) y, recientemente, el Índice Estandarizado de Precipitación Evapotranspiración (SPEI) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). Mediante estos indicadores se logra comparar la severidad de la sequía en tiempo y espacio, razones por las cuales conviene revisar sus principales características.

1.1.2.1 Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI)

El PDSI es uno de los indicadores multivariados más representativos al dimensionar una sequía meteorológica, aunque es ampliamente utilizado en la sequía agrícola. Se fundamenta en la pérdida de humedad basada en el concepto de oferta y demanda de agua y en la ecuación del balance hídrico en un modelo de suelo de dos capas. Así es posible estimar la evapotranspiración, escurrimiento y recarga del suelo. La metodología que siguió Palmer se sintetiza en los siguientes apartados:

- 1. Contabilidad hidrológica.** El cálculo de la PDSI comienza con la compilación de una larga serie de registros de temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial mensuales, así como la capacidad disponible de agua. En seguida se hace un balance hídrico. Es necesario que el suelo se divida en dos capas: la superior y la subyacente, consideradas para la acumulación y extracción del agua.
- 2. Coeficientes climáticos.** En este apartado se hace una calibración del modelo de balance hídrico, donde se resumen los resultados anteriores para obtener constantes o coeficientes que dependen de la climatología de la zona bajo análisis. En este sentido cada uno representa una razón de proporción entre valores actuales respecto a valores potenciales.
- 3. Valores Climáticamente Apropriados para las Condiciones Existentes (CAFEC).** Los coeficientes derivados se utilizan para volver a analizar la serie y así determinar la cantidad de humedad requerida para el clima "normal" durante cada mes.

4. Índice de anomalías de humedad. Para cada mes j , la diferencia entre precipitación real y precipitación CAFEC indica la deficiencia de agua o superávit. En este sentido, las desviaciones se convierten en índices de anomalía de humedad.

5. Análisis de la serie de índices. En este proceso se determina el inicio y final de periodos secos, además de la severidad de sequía.

Para finalmente tener una asignación de valores que van de +4 (condiciones extremadamente húmedas) hasta -4 (condiciones de sequía extrema), tal y como se ilustra en el Cuadro 1.3.

Cuadro 1.3 Clasificación de Palmer para los periodos húmedos y secos

Valor del Índice (X)	Clasificación
≥ 4.0	Extremadamente húmedo
3.00 a 3.99	Muy húmedo
2.00 a 2.99	Moderadamente húmedo
1.00 a 1.99	Ligeramente húmedo
0.5 a 0.99	Humedad incipiente
0.49 a -0.49	Normal o cercano a lo normal
-0.5 a -0.99	Sequía incipiente
-1.00 a 1.99	Sequía ligera
-2.00 a 2.99	Sequía moderada
-3.00 a 3.99	Sequía severa
≤ -4.00	Sequía extrema

Fuente: Palmer (1965: 28)

Desde su creación, el Índice Palmer ha sido ampliamente utilizado por una variedad de profesionistas (hidrólogos, ingenieros forestales, meteorólogos de campo, economistas, responsables políticos, medios de comunicación, consultores privados e investigadores) como una herramienta para supervisar y evaluar a largo plazo (en términos meteorológicos) la sequía y las condiciones húmedas de rachas (Heim, 2002: 1159). Sin embargo, a pesar de ser uno de los referentes más utilizados se le han encontrado varias desventajas, como las que menciona Michael J. Hayes, director del *National Drought Mitigation* (2016):

- Las dos capas de suelo dentro de los cálculos del balance hídrico se generalizan y pueden no ser representativas ni aplicables en áreas con condiciones diferentes a las de Iowa y Kansas, en los Estados Unidos de América.

- Las nevadas, la capa de nieve, y el suelo congelado no se incluyen en el índice, solamente se consideran las lluvias normales, por lo que los valores PHDI obtenidos pueden ser inexactos en los meses de invierno y primavera en regiones donde se presentan nevadas regulares.
- El desfase natural entre la precipitación y la escorrentía resultante no se considera. Además, no se permite el escurrimiento dentro del modelo hasta que la capacidad de agua de las capas superficiales del suelo y el subsuelo está saturada, lo que lleva a una subestimación de la escorrentía.
- La evapotranspiración potencial se estima por el método de Thornthwaite. Esta técnica tiene amplia aceptación, pero todavía se trata de un método meramente aproximativo.

Además “[...] carece de la flexibilidad para reflejar la naturaleza multi-escalar de las sequías” (Serrano *et al.*, 2010: 687).

1.1.2.2 Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

El SPI se desarrolló como una herramienta para definir un evento de sequía (su duración, intensidad y magnitud), además para poder contar con un monitoreo del fenómeno (McKee *et al.*, 1993). La naturaleza de este parámetro posibilita llevar a cabo un análisis que permite diagnosticar la frecuencia de una sequía, o bien, de un evento anormalmente húmedo a una escala de tiempo funcional para cualquier lugar en el mundo que cuente con un registro de precipitación (Edwards y McKee, 1997).

Los registros se ajustan a una distribución de probabilidades para después ser transformados a una distribución normal y así construir el indicador “[...] que actualmente se utiliza en las investigaciones o en modo operativo en más de 70 países” (OMM, 2012: 4). Entre las instituciones que destacan se pueden mencionar el Centro Nacional de Mitigación de Sequía y el Centro Climático de Colorado, ambos en los Estados Unidos de América, así como el Monitor de Sequía en México (MSM). A continuación, se describen los pasos para su cálculo (Edwards y McKee, 1997).

- Los datos de la estación son ajustados a una función de probabilidad gamma. Se considera esta opción debido a que ciertas variables, como la precipitación, tienen como límite inferior el cero, por lo que la curva normal (abierta en ambos sentidos) no es la adecuada, razón por la cual se sustituye por la distribución gamma. Ésta es asimétrica, extendida a la derecha, con límites que van de 0 a $+\infty$.

La distribución gamma se define por su función de frecuencias o densidad de probabilidad, la cual se expresa por la fórmula:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}$$

Donde;

$x > 0$ *x es la cantidad de precipitación*
 $\alpha > 0$ *α es un parámetro de forma*
 $\beta > 0$ *β es un parámetro escalar*

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \Gamma(\alpha): \text{es la función gamma}$$

El cálculo del SPI implica el ajuste a esta función para dar una distribución de frecuencia de los totales de precipitación. Los parámetros alfa y beta de la función se estiman para cada estación, para cada escala de tiempo de interés (3 meses, 12 meses, 48 meses, etc.) y para cada mes del año. Las soluciones de máxima probabilidad se utilizan para estimar de manera óptima α y β (Thom, 1966):

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right]$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}}$$

Donde: $A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}$

\ln = logaritmo natural del promedio de los valores de precipitación para un mes determinado.

n = número de precipitación observada

Sin embargo, Crespo (*op.cit.*:31) expresa que el interés principal de la aplicación de la función gamma en el análisis climático no es la aplicación de la ecuación densidad de probabilidad que es una función de frecuencias, sino su integral de la que se obtienen probabilidades de ocurrencia de una precipitación menor o igual que una precipitación determinada (x), la cual se expresa:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\hat{\beta}} dx$$

Ante el hecho de que la función gamma es indefinida para valores de $X = 0$ y, de igual manera, una distribución de precipitación puede tener ceros (en especial ocurrirán con mayor frecuencia en regiones áridas y semiáridas). Conviene expresar la probabilidad acumulada en términos de la siguiente expresión:

$$H(x) = q + (1 - q) G(x)$$

q = es la probabilidad de tener valores de cero;

$q = m/n$; donde:

m es el número de ceros en una serie de registros de precipitación

y n es el número de registros de precipitación

$1 - q$ = es la probabilidad de no tener valores de cero

Así, la probabilidad acumulada $H(x)$ se convierte en la variable normalizada "Z", la cual es equivalente al valor del SPI, con una media de cero y una varianza de uno, Figura 1.6.

En su trabajo McKee (*et al.*, 1993) explica esta transformación con base en la equiprobabilidad (Panofsky y Brier, 1958), donde se establece que la característica esencial de la transformación de una variable aleatoria con distribución gamma a una variable aleatoria con distribución preestablecida (distribución normal) radica en la similitud del comportamiento de la probabilidad de tener un valor dado, igual o menor que la variable aleatoria, tanto en la distribución gamma como en función transformada.

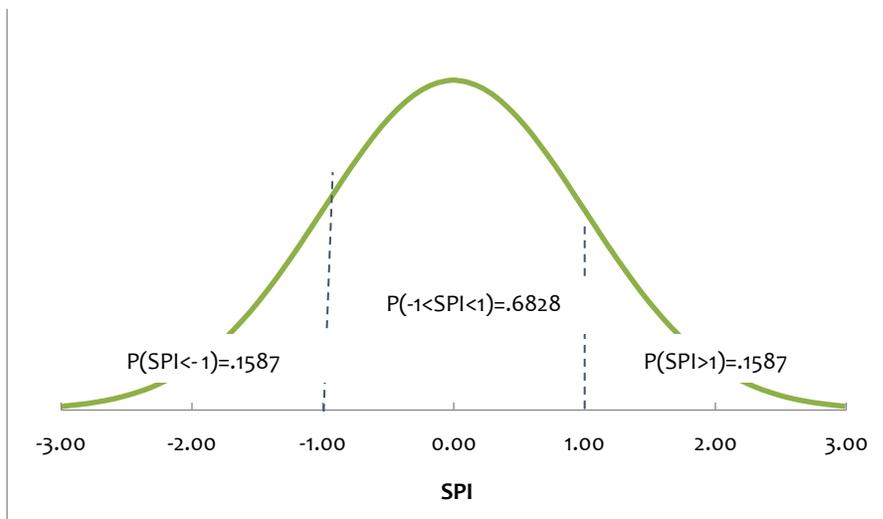


Figura 1.6 Probabilidad acumulada del SPI

Fuente: Edwards y McKee, 1997: 25

Con el propósito de facilitar la obtención del SPI, los valores de Z pueden ser calculados por medio de una aproximación, la cual convierte la probabilidad acumulada gamma a un valor de probabilidad estándar normal o variable Z mediante las fórmulas siguientes:

$$Z = SPI - \left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 + d_3 t^3} \right) \text{ para } 0 < H(x) \leq 0.5$$

$$Z = SPI + \left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 + d_3 t^3} \right) \text{ para } 0.5 < H(x) < 1.0$$

Además, sin importar la ubicación o el tiempo de escala, el SPI representa la probabilidad acumulada en relación con el periodo base, para los cuales se estimaron los parámetros gamma como se representa en la Figura 1.7.

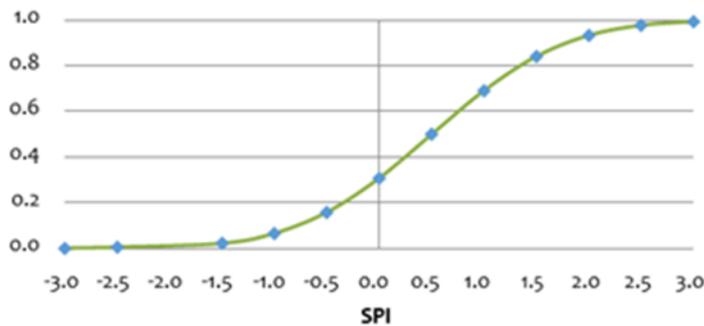


Figura 1.7 Probabilidad gamma acumulada del SPI

Fuente: Edwards y Mckee, (1997: 26)

Cuadro 1.4 Clasificación del SPI según su condición respecto a la media normal

SPI	Clasificación
≥ 2	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Muy húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Cercano a lo normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a 1.99	Severamente seco
≤ -2.0	Extremadamente seco

Fuente: Mckee et al., 1993: 18

Por lo tanto, es fundamental conceptualizar tres etapas diferenciadas dentro del mismo fenómeno. Primero, la condición de sequía existirá cuando la precipitación registrada en el lugar de estudio esté una desviación por abajo de su valor normal. O bien, puede presentarse un periodo en el cual el valor SPI es continuamente negativo (respecto a la media), el cual comienza cuando el SPI cae por debajo de cero y termina cuando el valor de SPI regresa a valores positivos, situación conocida como episodio. Finalmente, la intensidad del fenómeno se califica mediante diversas categorías según el valor SPI, las cuales se ilustran en el Cuadro 1.4.

Como se ha dicho también es posible calcular el SPI de uno hasta 72 meses. Sin embargo, la OMM (2012) recomienda utilizar la franja de aplicación de entre uno y 24 meses. En el Cuadro 1.5 podemos apreciar las características y empleo común de sus diferentes escalas temporales. El cálculo de cualquiera de ellos dependerá del objetivo de estudio, por ejemplo, si el propósito es identificar como fueron afectados los cultivos de temporal primavera-verano el intervalo recomendado es de nueve meses porque éste va a incluir todo el ciclo agrícola; es decir, si ejecutamos el SPI₉ al final del mes de noviembre, éste comparará la precipitación total de marzo a noviembre de todos los años de registro, dando como resultado las anomalías respecto a los registros históricos.

Cuadro 1.5 Características y usos de las diferentes escalas temporales del SPI

Escala temporal	Características	Usos
SPI 1	Es muy parecido a un mapa que muestre el porcentaje de precipitación normal para un periodo de 30 días	Especialmente para sequía meteorológicas y el estrés de cultivos a corto plazo, por ejemplo, durante la estación de crecimiento
SPI 3	Refleja las condiciones de humedad a corto y medio plazo, y proporciona una estimación estacional de la precipitación	Tendencias de precipitación durante etapas posteriores al cultivo
SPI 6	Revela anomalías estacionales	Identifica deficiencias de humedad en temporadas completas del ciclo agrícola
SPI 9	Da una indicación de pautas de precipitación interestacionales en escalas temporales medias	Impacto significativo en la agricultura y puede que también esté afectando a otros sectores
SPI 12	Refleja patrones de precipitación a largo plazo	Impactos en cauces fluviales y niveles de acuíferos

Fuente: OMM, 2012

En los estudios donde se ha aplicado este parámetro de la precipitación prevalece la opinión de algunos especialistas (Velasco y Aparicio, 2004; Hurtado y Cadena, 2002; Núñez, S. *et al.*, 2005) al afirmar que el índice presenta varias ventajas, por ejemplo:

- a) Sintetiza apropiadamente las características de la sequía como fenómeno natural.
- b) Es de fácil cálculo al utilizar como único parámetro a la precipitación.
- c) Tiene gran flexibilidad y puede utilizarse para varios periodos de tiempo con los mismos datos de entrada.
- d) Es una herramienta versátil para el estudio de la climatología de los eventos secos y húmedos.

Sin embargo, la principal crítica al SPI es que se basa únicamente en datos de precipitación y no considera otras variables; por ello, Crespo (*et al.*, 2007) alude a la problemática presentada al contar con bajo número de registros con dato, debido a que cambios mínimos en ellos pueden impactar en valores de SPI drásticos de un mes a otro.

1.1.2.3 Índice Estandarizado de Precipitación Evapotranspiración (SPEI)

Este referente es uno de los índices más recientes en términos de cuantificar la sequía. Se sustenta en registros de precipitación y evapotranspiración, combina la sensibilidad a los cambios en la demanda de evaporación, característico del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI), con la sencillez de cálculo y la naturaleza multi-temporal del SPI (Serrano *et al.*, 2010).

Por medio de este indicador Serrano trata de remediar la principal carencia del SPI, al considerar también la evapotranspiración. Aunque, como él mismo lo señala "solo se han encontrado pequeñas diferencias en los resultados comparando el SPI y el SPEI, ya que las correlaciones entre ambos son significativamente altas" (*op. cit.*, 2010).

Después de revisar los tres índices anteriores se espera sea posible tener una mejor percepción de ellos. Por lo tanto, para este estudio se consideró adecuado emplear el SPI, ya que con base en estudios mencionados, además de ser sencillo de calcular, es eficiente y sintetiza apropiadamente las características de la sequía como fenómeno natural.

Adicionalmente, es relevante mencionar que la Organización Meteorológica Mundial (OMM) así como la Asociación Mundial para el Agua (2016) catalogan al SPI como punto de partida para la vigilancia de sequías meteorológicas asignándole un color verde, lo cual significa que cumple al menos dos de los cuatro criterios con los que fue contrastado, estos

son:

- Existe un código o programa de fácil acceso y de libre utilización para ejecutar el índice.
- No hacen falta datos diarios.
- Se puede ejecutar, aunque falten datos.
- El producto del índice ya se genera de forma operativa y se puede consultar en línea.

Al respecto, es pertinente mencionar que existe un programa de fácil acceso y de licencia libre para generar el índice en computadoras personales; los datos que se requieren son mensuales y no diarios, sin embargo, la serie tiene que estar completa.

1.2 Efectos de la sequía 2011-2012 en la producción agrícola de México

En el caso de México, los impactos de las sequías probablemente se han manifestado desde que se establecieron las sociedades sedentarias, basadas en la agricultura, hasta nuestros días. Este fenómeno siempre ha afectado a los distintos sectores socioeconómicos, pero con especial trascendencia sobre la población rural que vive del autoconsumo y/o es dependiente del temporal (Ortega y Velasco, 2013: 88). En el país la agricultura de riego y la de temporal son fuente fundamental de empleo e ingresos. Es de esperar que una sequía generalizada represente una perturbación significativamente negativa en la economía local y nacional.

En lo que respecta a la agricultura de temporal, demanda una atención especial por el hecho de representar la principal fuente de manutención para miles de familias campesinas que viven del autoconsumo. Su dimensión espacial es trascendental pues abarca 73.1 % de la superficie agrícola nacional (15.5 millones de hectáreas), mientras el 26.9 % restante (5.7 millones de hectáreas) son de riego (SIAP, *op. cit.*). Al contar con sistemas de regadío esta última supone un impacto negativo seguramente menor.

Así, un déficit significativo en la precipitación reducirá tanto la producción como la calidad de las cosechas (en especial en tierras de temporal), además las repercusiones también se reflejarán en el ámbito económico. Según la SEMARNAT (2013: 9) los efectos de la sequía en la agricultura pueden resumirse en los siguientes rubros:

- Siniestralidad de cultivos anuales y perennes.
- Daño a la calidad de las cosechas.
- Pérdida de ingresos para los agricultores debido a la reducción de las cosechas.

- Productividad reducida de las tierras de cultivo (erosión del viento, pérdida de materia orgánica, etc.).
- Plagas de insectos.
- Enfermedades de las plantas.
- Daño de la fauna salvaje a las cosechas.
- Incremento en los costos de irrigación.
- Costos para acceder a recursos hídricos nuevos o suplementarios.

En este sentido, dentro del presente trabajo se hace hincapié en la siniestralidad como el principal elemento que refleja la presencia y efectos negativos de la sequía, en particular la del año 2011.

El periodo al que se hace referencia en esta tesis es relevante, ya que, como se observa en la Figura 1.8, a lo largo del año 2011 se presentó una situación de déficit de precipitación dentro del territorio nacional que se calificó como de excepcional gravedad, la cual se extendió hasta mediados de 2012, donde "[...] México vivió la peor sequía en siete décadas, la cual generó pérdidas económicas en la producción agrícola que superan los 16 mil millones de pesos, según el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (1.3 mil millones de dólares en ese año), afectando 70 % del país. Ésta diezmo a la agricultura en los estados norteros de Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí, Tamaulipas y Durango, así como Zacatecas y Aguascalientes" (Ortega y Velasco, *op. cit.*: 85). Sin embargo, la Comisión de Agricultura de la Cámara de Diputados de México estimó un costo de 150 mil millones de pesos a causa de este fenómeno (CONAGUA, 2014).

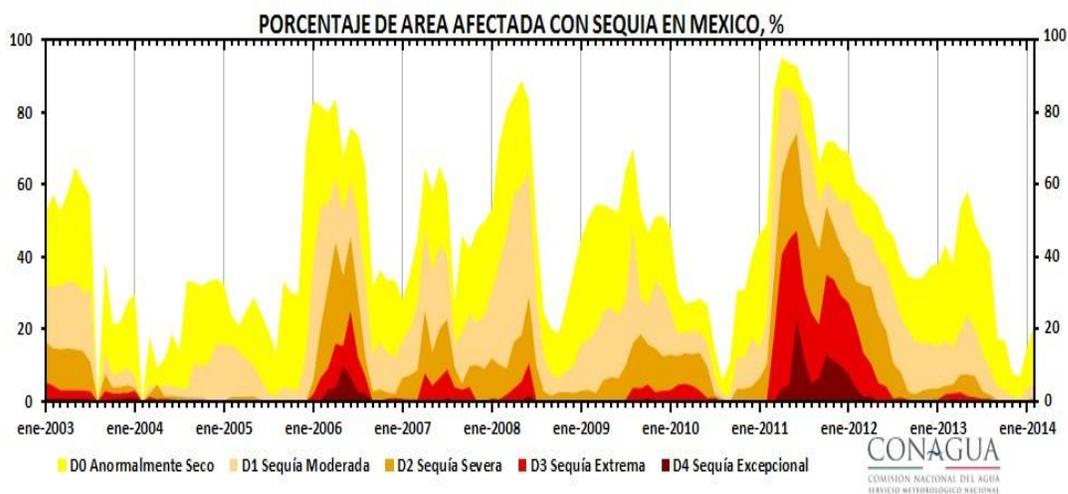


Figura 1.8 Área afectada por sequía en México en el periodo de enero de 2003 a enero de 2014

Fuente: SMN, 2014

Los informes mensuales de Monitoreo de Sequía de América del Norte (NADM)⁵ para el caso de México señalaron que desde octubre de 2010 se registraron lluvias por debajo de lo normal a nivel nacional, además de que las regiones impactadas por algún tipo de sequía se expandieron hasta alcanzar en junio del 2011 al 85 % de la superficie total del país, porcentaje que disminuyó progresivamente con el establecimiento tardío de la temporada de lluvias, reduciéndose entonces hasta 55 % en septiembre; en octubre se incrementó otra vez al 61 %. En diciembre la sequía disminuyó ligeramente en el norte, pero se extendió hacia el centro (Figura 1.9).

En enero de 2012 la producción de maíz y frijol de temporal reportaba pérdidas superiores a los 15 mil millones de pesos. En ese mes el gobierno federal aprobó un plan de emergencia cercano a 34 mil millones de pesos para enfrentar la condición de desastre por sequía en más de mil municipios de 22 estados. Los apoyos fueron concentrados en las regiones afectadas de manera extrema, en entidades como Chihuahua, Coahuila, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas. A pesar de los importantes montos, la Confederación Nacional Campesina (CNC) aseguró fueron insuficientes (NADM, 2012).

Pese al impacto negativo que han tenido las sequías en la producción agrícola en México, la atención de este fenómeno en las últimas décadas está basado en un enfoque reactivo, donde lo primordial ha sido el alivio de las crisis provocadas por la sequía y no la gestión del riesgo. “Ante esa insuficiencia, la población y los diversos sectores socioeconómicos de ciertas áreas del país (sobre todo en el norte y centro) siguen siendo altamente vulnerables ante los embates periódicos del fenómeno” (Ortega y Velasco, *op. cit.*: 88).

En este sentido, la afirmación de la CNC sobre la insuficiencia de los apoyos gubernamentales ante los efectos de estos fenómenos, mencionada antes, puede interpretarse desde la perspectiva de la contingencia en términos de que cualquier acción correctiva generalmente tendrá un alto costo, a pesar de los cuales difícilmente logrará atemperar de manera significativa los daños registrados.

Después de enfrentar la sequía de 2011-2012, el Gobierno Federal, a través de la CONAGUA, estableció en enero de 2013 el Programa Nacional Contra la Sequía (PRONACOSE) como acción de gestión de riesgo, buscando reducir la vulnerabilidad de México ante ese evento, reconociendo que las acciones preventivas pueden disminuir las pérdidas en general, en

⁵ Monitor de Sequía de América del Norte (NADM). Es el resultado de la cooperación técnica entre expertos de sequía de México, Estados Unidos y Canadá, tiene como objetivo describir las condiciones de sequía en América del Norte. En el caso de México es el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) la dependencia oficial del gobierno encargada de proporcionar información meteorológica (estado del tiempo) y climatológica (SMN-CONAGUA, 2016).

especial dentro de los sectores y regiones más vulnerables, reconociendo que la inversión dirigida a anticipar los efectos adversos tendrá mayor probabilidad de disminuir de manera sustancial los impactos económicos, así como el sufrimiento de la población (CONAGUA, 2014).

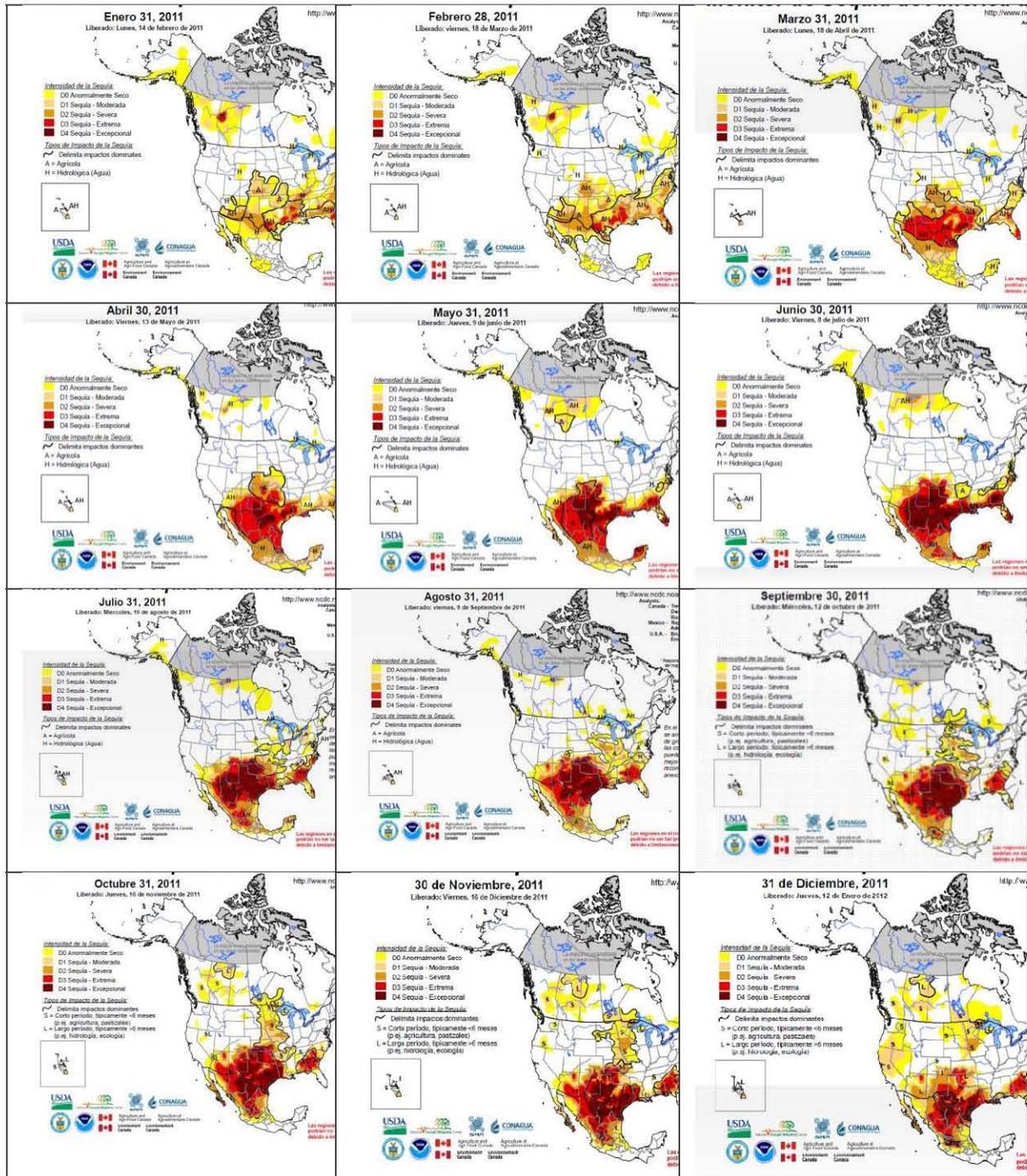


Figura 1.9 Evolución de la sequía por mes en México

Fuente: NOAA, 2011

1.3 Medidas para mitigar la sequía en México

Las medidas para mitigar la sequía a nivel nacional se establecen en estructurales y no estructurales. Las primeras se basan en construcciones y obras de ingeniería que ayudan a controlar, almacenar, extraer y distribuir el agua con el fin de optimizar el uso del agua durante la sequía. Mientras que las segundas son acciones que se adoptan antes y durante este fenómeno para disminuir sus efectos negativos. Estas medidas son socioeconómicas, legales, de planeación y se refieren principalmente a reglamentos sobre uso del agua (CENAPRED, 2002).

Como se mencionó con anterioridad, las medidas institucionales en el país ante la sequía se inclinaban a ser reactivas con apoyos económicos después de una declaratoria de desastre. En particular, para el evento de 2011 la CONAGUA (2014) expresó que éste ha sido el mejor atendido, ya que se involucraron diferentes secretarías para su atención y control. Se fortaleció el programa de empleo temporal para reducir la migración en los estados afectados, el gobierno federal brindó el servicio de reparto de agua en pipas en los estados más perjudicados y los gobiernos, tanto en el ámbito federal como los estatales, promovieron coberturas de seguros para los productores buscando disminuir las pérdidas por las malas cosechas.

En vista de lo anterior, la población rural de México cuenta con la más alta vulnerabilidad ante los desastres naturales (en este caso la sequía) tanto en su capacidad productiva como en su patrimonio y, en casos extremos, su integridad física (FAO, 2014).

Si bien es cierto que muchas poblaciones indígenas y campesinas están particularmente expuestas a los impactos del cambio climático y son más vulnerables, dados sus estilos de vida ligados a recursos naturales en ecosistemas marginales, muchas de estas mismas poblaciones están activamente respondiendo a las condiciones climáticas cambiantes y han demostrado innovación y resiliencia frente al cambio climático (Altieri y Nicholls, 2013: 7).

En este sentido, Solares y García (2014) señalan que desde siempre los campesinos han cultivados sus tierras, tradición que les ha permitido desarrollar y acumular experiencia, logrando alcanzar niveles muy elevados en el ámbito de predictibilidad climática, de tal suerte que definían con un grado aceptable de certidumbre los periodos más adecuados para sus siembras, en virtud del inicio de las lluvias y del fin de las heladas.

Altieri y Nicholls (2008) mencionan estrategias conocidas que productores campesinos han implementado para disminuir los efectos a las sequías, dentro del contexto nacional se reconocen los siguientes:

- **Sistemas de cultivos múltiples o policultivos:** estos exhiben una mayor estabilidad y menos declinaciones de la productividad durante una sequía, en condiciones favorables que superan el caso de monocultivos.
- **Colecta de plantas silvestres:** durante sequías u otras épocas de *stress* ambiental muchas plantas silvestres son consumidas; por ejemplo, los pueblos Purhépecha y Tarahumara que complementan su alimentación con plántulas de maleza (quelites) durante un periodo crítico del maíz.
- **Sistema agrícola tradicional de los Papago:** se basa en el riego de sus campos por medio de arroyos intermitentes creados por tormentas; aparte de lo anterior agregan material orgánico (hojarasca de leguminosas ricas en nitrógeno, heces de roedores y otros *detritus* descompuestos de las tierras altas) para aumentar la fertilidad de sus tierras. Así, los cultivos que producen (principalmente frijoles tepary, maíz, calabazas y otros) crecen lo bastante rápido como para evitar la mortalidad debido a la sequía prolongada.
- **Bordos (Otomí del valle de Mezquital):** con un conocimiento detallado de suelos, relieve, vegetación y los movimientos del agua, el pueblo Otomí construye bordos para atrapar el agua de lluvia y concentrar los sedimentos en el suelo. Esta clase de bordo se llama *atajadizo*. Toma seis o siete tormentas de lluvia para conseguir una cosecha de maíz y frijoles en bordos de ladera y atajadizos. Los bordos se colocan normalmente a lo largo de los contornos para tomar la mejor ventaja de la corriente. La colocación de piedras y de plantas del maguey son cruciales durante la construcción de bordos, y los campos recurrentemente se fertilizan con estiércol para mejorar el suelo.

Conforme con lo anterior, el rescate de los conocimientos empíricos de los agricultores es fundamental; sin embargo, al conjugarse con las estrategias contemporáneas dará como resultado sistemas agrícolas más sólidos y resilientes ante fenómenos como la sequía. Esto es a lo que la SAGARPA (2015) llama sinergia para la transformación del campo.

Lo anterior hace hincapié en que sin duda es importante identificar la amenaza que pueda dañar al sistema; sin embargo, resulta trascendental desarrollar estrategias para poder tolerar y recuperarse ante sus efectos.

1.4 Enfoques metodológicos en relación con los efectos de sequía agrícola

Dentro del marco teórico se abordaron conceptos de sequía y sus repercusiones haciendo énfasis en el sector agrícola. En el presente apartado se revisarán los métodos empleados para poder reconocer estos impactos negativos de forma espacial.

Después de reconocer diferentes índices de sequía y los efectos del fenómeno en la agricultura nacional es conveniente referir una serie de antecedentes metodológicos, los cuales integran estos dos elementos (sequía y producción agrícola) para después construir un procedimiento con el cual se intente demostrar que la relación espacial de intensidad de sequía podría no corresponder con el porcentaje de superficie siniestrada registrada en Zacatecas.

El primero corresponde a la FAO (2016); institución que, con el objetivo de aumentar la resiliencia de los medios de vida ante las amenazas y crisis, desarrolló el llamado Índice de Estrés Agrícola (ASI, por sus siglas en inglés). El cual está basado en datos teledetectados de vegetación y temperatura de la superficie de la tierra, junto con información sobre ciclos de cultivos agrícolas obtenidos de series históricas y una máscara mundial de cultivos. El ASI integra el Índice de Salud de la Vegetación (VHIV, por sus siglas en inglés), este último considera dos dimensiones fundamentales para la evaluación de un episodio de sequía en la agricultura: la temporal y la espacial.

A manera de ejemplo, en la Figura 1.10 es posible observar la determinación del ASI a nivel mundial durante el mes de julio de 2011. El mapa muestra valores de entre 55 y 85 % de estrés agrícola dentro del territorio nacional y mayores a 85 % en el sureste de Estados Unidos de América.

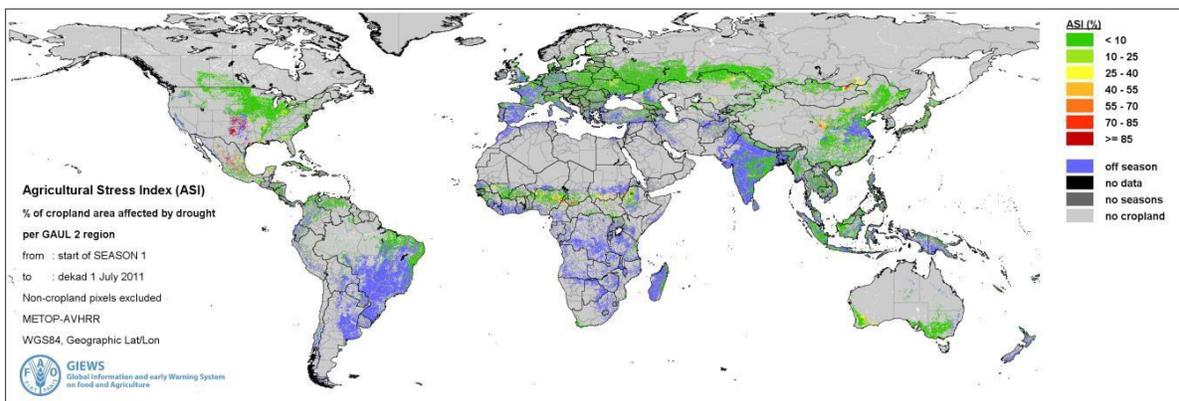


Figura 1.10 Índice de Estrés Agrícola, julio de 2011

Fuente: FAO, 2016

Los pasos que sigue la FAO para calcular el ASI son tres: el primero consiste en obtener un promedio temporal del VHI, evaluando la intensidad y duración de los periodos secos que tienen lugar durante el ciclo de cultivo para cada píxel de un km; el segundo paso radica en determinar la extensión espacial de los episodios de sequía calculando el porcentaje de píxeles en zonas de cultivo con un VHI por debajo del 35 % (este valor fue identificado como un umbral crítico en la evaluación del alcance de la sequía en investigaciones anteriores); finalmente, cada zona administrativa se clasifica de acuerdo al porcentaje de área cultivada afectada por sequía; esto para facilitar la rápida interpretación de los resultados por parte de los analistas.

De esta forma, en la página <http://www.fao.org/giews/earthobservation/> es posible visualizar y descargar el ASI por país y por sus subdivisiones (en el caso de México corresponden a estados) cada año a partir de 1984 en formato EXCEL; donde nos señala el porcentaje, dentro de un área político-administrativa, que ha sido afectado por las condiciones de sequía en toda la temporada de cultivo.

El segundo estudio a cargo de Corvera (*et al.*, 2006) resulta relevante para este trabajo, pues el territorio analizado es el estado de Zacatecas. Dicho análisis relaciona la intensidad de sequía con la superficie afectada por sequías históricas.

En lo que respecta a las bases de datos toman 117 estaciones meteorológicas distribuidas dentro de la entidad, para después integrar esa información (en este caso referente a la precipitación pluvial) al Sistema de Información Geográfica para la gestión de sequía en el estado de Zacatecas (SIG-GESEZA 1.0), el cual permitió evaluar cuantitativamente la sequía como fenómeno. De manera adicional facilitó determinar sus impactos en la agricultura de temporal y en incendios forestales.

El uso del SIG-GESEZA 1.0 contempla los pasos que se enuncian a continuación:

- a) Acceder a una base de datos donde se consultó, modificó y se agregaron datos de precipitación o estaciones climáticas.
- b) Calcular el SPI para una escala de 1, 3, 6, 9, 12, 28, 24, 36, y 4XCEL8 meses de cada una de las estaciones y obtener los valores en archivos EXCEL.
- c) Crear archivos para generar mapas que representen al SPI.
- d) Generar entradas de isoyetas. Crear archivos para generar mapas de precipitación.
- e) Generar mapas correspondientes a isoyetas o SPI.

Luego de elaborar los materiales cartográficos finales hacen una descripción de la distribución del SPI, se destacaron los municipios donde se registraron las mayores intensidades y se relacionaron con datos históricos (de 1990 a 2005) de superficie perdida por causa de la sequía. Finalmente se elaboró un gráfico para representar las hectáreas perdidas por sequía en relación con el SPI.

El tercer estudio es ajeno en principio al tema de sequía; sin embargo, durante la estancia realizada en la Universidad Autónoma de Madrid fue posible conocer la metodología planteada y adaptarla a la presente investigación, ya que en ésta es posible definir la intensidad que presenta un fenómeno continuo sobre un espacio específico. El estudio de Moreno (2013) mide en qué grado varios grupos sociodemográficos sufren una exposición potencial a la polución atmosférica (por dióxido de nitrógeno), igual o diferente que el conjunto de la población (norma de referencia) ubicado en la ciudad de Madrid. Los pasos que se consideraron pertinentes en este estudio se detallan a continuación:

- Interpolación de los valores del NO₂, de la muestra espacial de 32 estaciones por el inverso de la distancia (*IDW, Inverse Distance Weighting*). A continuación, se generó una capa *raster (grid)* con las medias estimadas de NO₂ para todo el municipio a una resolución de 50 m.
- Reclasificación de los valores de la capa interpolada de NO₂ para el área urbana poblada (AUP).
- Obtención de capas *raster* conteniendo en cada pixel la población total y de los grupos seleccionados. La generación de estas capas *raster* de población requirió estas operaciones:
 - a) Elaborar una capa *raster* con el número de pixeles de cada sección censal (AUP), a partir de dos capas previas, una con los códigos de las secciones y otra con datos binarios (0/1) delimitando la AUP.
 - b) Conversión a *raster* de la capa vectorial de secciones censales (AUP), asignando a los pixeles las cifras de población (total y de cada uno de los grupos estudiados) contenidas en su tabla de atributos.
 - c) Finalmente, creación de capas *raster* con la cifra de habitantes por pixel, mediante cociente (calculadora *raster*) entre las capas generadas en las etapas previas (a y b). Con ello se obtiene una capa para la población total y otras tantas para cada uno de los grupos sociodemográficos.

Con ese conjunto de elementos es posible realizar ya cálculos estadísticos con los datos de población y en términos de niveles de polución.

- Obtención de tablas de frecuencias, conteniendo el recuento de la población (total y de cada uno de los distintos grupos) en los dos intervalos de polución (mediante la operación *Zona Statistics* de ArcGIS).

Las especificaciones anteriores hacen posible asignar la información de un fenómeno que se distribuye de manera relativamente uniforme y continua en un espacio específico (como lo es la concentración de NO₂) sobre unidades político-administrativas concretas (por ejemplo, colonias situadas en el centro de la localidad), mediante diversas transformaciones espaciales hasta caracterizar cada una de esas unidades con un valor particular.

1.4.1 Hacia una propuesta de metodología representativa

Los estudios anteriores enfatizan la utilidad de emplear técnicas de análisis espacial como elementos fundamentales para lograr los objetivos propuestos. El primero de ellos por medio de teledetección remota; el segundo representa información puntual de una estación establecida y realiza comparaciones entre datos de mapas y tablas. Por su parte, el tercer estudio logra medir en qué grado diferentes grupos de población sufren una exposición potencial ante los efectos de un fenómeno.

En este sentido, el objetivo es aprovechar las propuestas técnicas mencionadas antes para configurar una metodología apropiada al tema de estudio y así comprobar el supuesto teórico en el cual se fundamenta esta investigación: "Ante la sequía registrada en el estado de Zacatecas en 2011, la superficie siniestrada correspondiente a tierras de temporal, durante el ciclo primavera-verano, fue inferior a lo esperado ante la magnitud que alcanzó el evento climático".

Para ello se utilizará la siguiente información:

- a) Estaciones climatológicas dentro del estado Zacatecas que cuenten con al menos treinta años de datos de precipitación.
- b) Porcentaje de Superficie Siniestrada (PSS) por municipio en el estado de Zacatecas; este dato se obtendrá con base en el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP).

- c) Áreas de cultivo de temporal en el estado de Zacatecas que corresponden al Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación Serie V. Capa Unión (Agricultura y Vegetación) de INEGI.

Los elementos anteriores se consideraron indispensables dentro del análisis y a partir de ellos se aplicó la metodología dirigida a dimensionar la relación espacial entre la magnitud de sequía y el porcentaje de superficie de temporal siniestrada. Los procedimientos se ejecutarán con el programa ArcGis versión 10.2.2 y se resumen de la siguiente manera:

1. Realizar un procedimiento de Interpolación con los datos puntuales de las estaciones climáticas seleccionadas, las cuales tienen asignadas un campo que representa el SPI. Como resultado se generará un archivo *raster*.
2. Convertir la capa vectorial (municipios) de Porcentaje de Superficie de Temporal Siniestrada (PSS) *raster*.
3. Reclasificación de los valores del SPI y PSS para contar con eficiente manejo de la información.
4. Efectuar una superposición algebraica de los valores de SPI y PSS para la obtención de una distribución espacial.
5. Obtención de tablas de frecuencias conteniendo el recuento del SPI y el PSS.

El desarrollo de los pasos anteriores será visualizado en mapas que denoten la distribución de severidad de sequía representada por el SPI y el Porcentaje de Superficie Siniestrada. Finalmente, con la superposición algebraica se distinguirá si a mayor sequía corresponde mayor PSS.

El procedimiento se sintetiza en la Figura 1.11, donde se esquematizan los pasos a seguir para comprobar la hipótesis planteada.

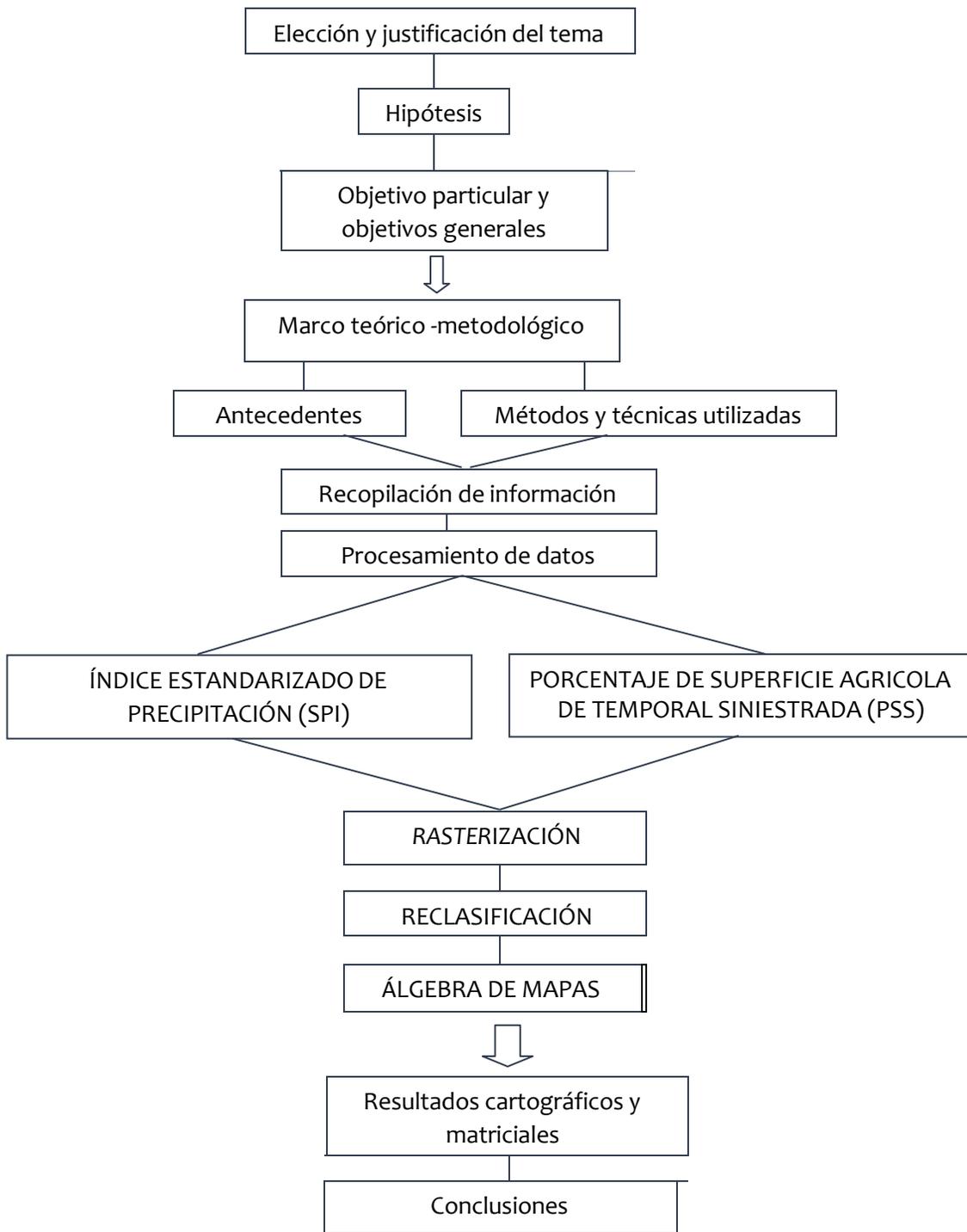


Figura1.11 Esquema metodológico

Fuente: Elaboración propia

Capítulo II

Estado de Zacatecas: medio físico y actividad agrícola

La actividad agrícola requiere de ciertas características físicas para lograr su mejor desarrollo, de no contar con ellas su desempeño se verá limitado. Ante esa realidad, los primeros apartados del presente capítulo se dedican a revisar aspectos sustanciales del entorno, como son el relieve, clima, suelo dominante, hidrología y uso de suelo, ya que el contexto físico resulta esencial para la comprobación (o rechazo) del supuesto hipotético que lo guía. Así las características físicas servirán de preámbulo para determinar por qué el estado de Zacatecas destaca en la producción agrícola nacional, a pesar de enfrentar limitantes naturales significativos.

Con este antecedente, la segunda parte del capítulo se dirige a analizar la agricultura de esta entidad federativa a partir de diversas estadísticas para identificar las principales zonas de producción y dimensionar el volumen logrado de cosechas; primero enmarcando a Zacatecas en el entorno nacional para después detallar su desempeño a escala municipal. Aquí se hace énfasis en el análisis de las superficies siniestradas municipales, con la idea de relacionarlas en el capítulo siguiente con el evento de sequía significativa registrado en 2011.

2.1 Condiciones físicas derivadas de la localización

Entre los varios elementos que presenta, la Figura 2.1 permite ubicar al estado de Zacatecas en la región centro-norte del país. Sus coordenadas extremas son:

Límite norte: 25°07'32" Límite sur: 21°01'48" Latitud norte
Límite este 100°44'09" Límite oeste 104°24'08" Longitud oeste

A partir de sus valores en latitud se tiene que el Trópico de Cáncer atraviesa esta entidad, circunstancia que aporta condiciones de amplia diversidad en términos físicos. Su superficie comprende 75 270 km², equivalente al 3.84 % de territorio nacional (INEGI, s. f.). De acuerdo con datos del último Censo de Población (INEGI, 2011) está integrado por 58 municipios, de los cuales la capital es Zacatecas. El estado colinda al norte con Durango, Coahuila de Zaragoza y Nuevo León; al este con San Luis Potosí y Aguascalientes; al sur con Guanajuato, Jalisco y Aguascalientes; al oeste con Nayarit y Durango.

2.1.1 Relieve

El relieve es útil como indicador capaz de identificar lugares con poca aptitud para el cultivo; como se sabe, los mejores generalmente son terrenos planos o de poca pendiente, razón por la cual es fundamental analizar los desniveles de cualquier zona que se intente incorporar a la actividad agrícola. En este sentido, Zacatecas enfrenta algunas limitaciones debido a la diversidad de elevaciones sobre el nivel del mar que presenta, las cuales van desde los 750 hasta más de 3100 metros.

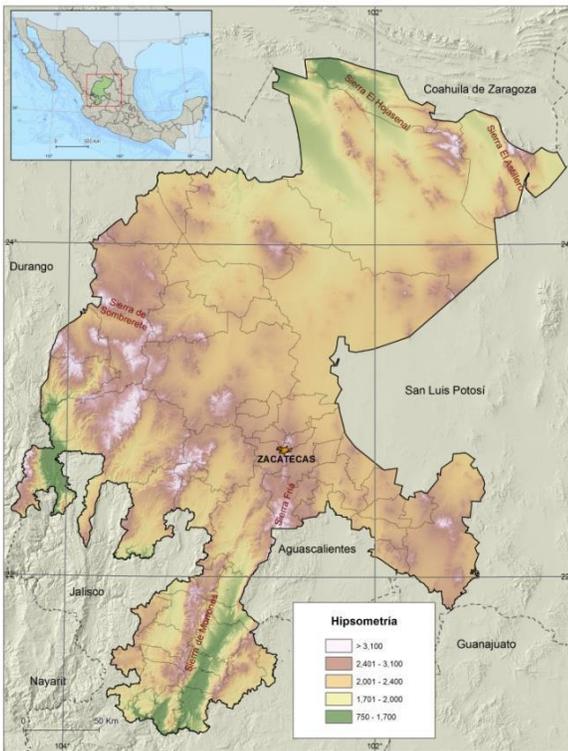


Figura 2.1 Ubicación de Zacatecas e hipsometría

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI. Sombreado del terreno elaborado a partir del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM), versión 3.0

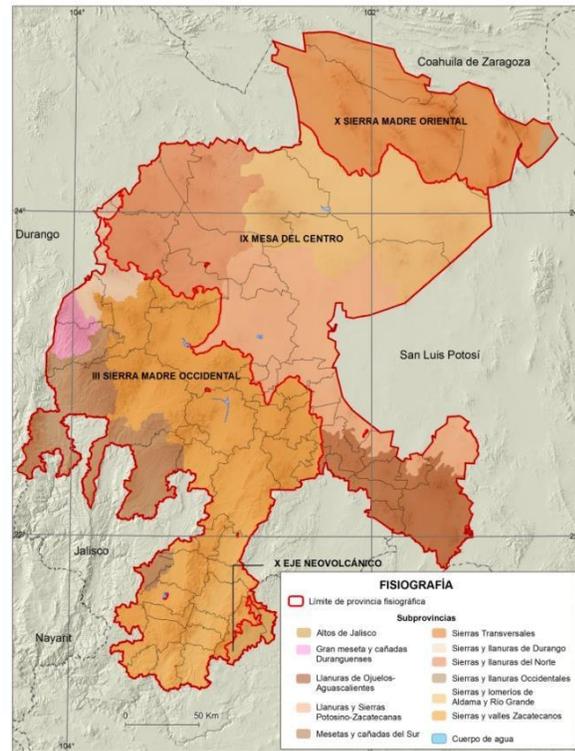


Figura 2.2 Fisiografía

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI. Conjunto de datos vectoriales fisiográficos, continuo nacional escala 1 a 1'000,000

En rigor, la simple revisión de la hipsometría representada, en Figura 2.1, permite identificar ciertas planicies en algunos tramos ubicados al sur del estado, así como otras zonas más amplias, también con pendiente suave situadas sobre la parte central del territorio zacatecano. Del mismo modo, el territorio estatal tiene la particularidad de distribuirse entre cuatro provincias fisiográficas, tal y como lo ilustra la Figura 2.2. La primera de ellas, al oeste, corresponde a la Sierra Madre Occidental, otra más se sitúa en la Sierra Madre Oriental al noreste, mientras que la Altiplanicie Mexicana se encuentra al norte y parte del centro, al sureste cuenta con una pequeña porción dentro del Sistema Volcánico Transversal. Como resultado de lo anterior, se puede destacar el predominio de serranías al sur, centro-norte, occidente y extremo norte de Zacatecas.

Así, dentro de la Sierra Madre Oriental transcurren las serranías El Hojasenal y El Astillero, con altitudes superiores a los 2400 msnm. Mientras en la parte sur se aprecian las sierras Morrones y Fría. La provincia Mesa del Centro, parte de la Altiplanicie Mexicana, se ubica en la porción centro-norte de la entidad, originando lomeríos alternados con amplias llanuras. Finalmente, hacia el corto tramo donde aparece el Sistema Volcánico Transversal menudean pequeñas sierras y lomeríos.

2.1.2 Clima

El clima es esencial como factor de confort que, además, favorece o limita en extremo el desarrollo de las actividades humanas en general. Sin duda, la acción agrícola es uno de los ámbitos donde se aprecian con mayor claridad sus efectos debido a que su influencia se ve reflejada en la distribución de cultivos. Así, por ejemplo, la vid se asocia con temperaturas templadas y lluvias en invierno.

Como expresa García (2012), los factores climáticos (como la latitud, altitud, relieve, distribución de aguas, continentalidad y corrientes marinas) provocan que los elementos del mismo varíen de un lugar a otro, dando como resultado diferentes tipos, incluso en espacios de relativamente poca extensión.

Es importante señalar el hecho de que el Trópico de Cáncer se proyecta por el centro de la entidad, lo que da como resultado la coexistencia de una zona intertropical caracterizada por presentar condiciones ambientales diferenciadas entre el norte y el sur; sin embargo, lo anterior se complementa con el relieve, el cual puede sintetizarse en la presencia de lomeríos seguidos por llanuras en el centro, rodeados al noreste y suroeste por serranías. La ubicación sobre el Trópico de Cáncer y la lejanía de los océanos favorecen en Zacatecas la presencia de variados tipos de climas y cierto grado de biodiversidad.

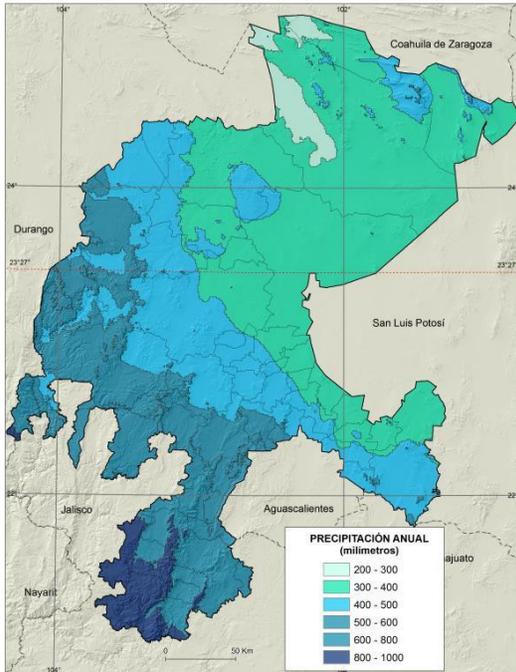


Figura 2.3 Distribución de precipitación total anual

Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO, portal de geoinformación, precipitación 1:1000000. Autor: García, E. (1998)

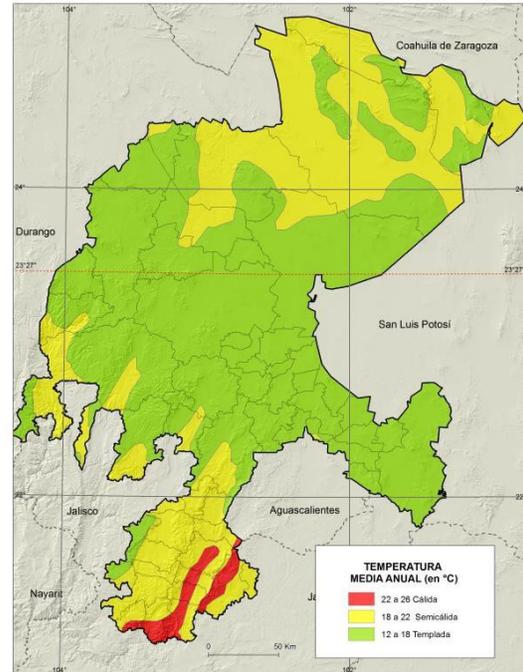


Figura 2.4 Distribución de temperatura media anual

Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO, portal de geoinformación, temperatura media anual 1:4000000. Autor: Vidal-Zepeda, R. (1990)

Como se sabe, se tienen dos elementos básicos para determinar la tipología climática de cualquier lugar; estos son la precipitación y la temperatura. Los extremos de estos eventos van a resultar perjudiciales en las actividades humanas, particularmente para las labores agrícolas de temporal, las cuales dependen del comportamiento de los elementos físicos para conseguir cosechas exitosas.

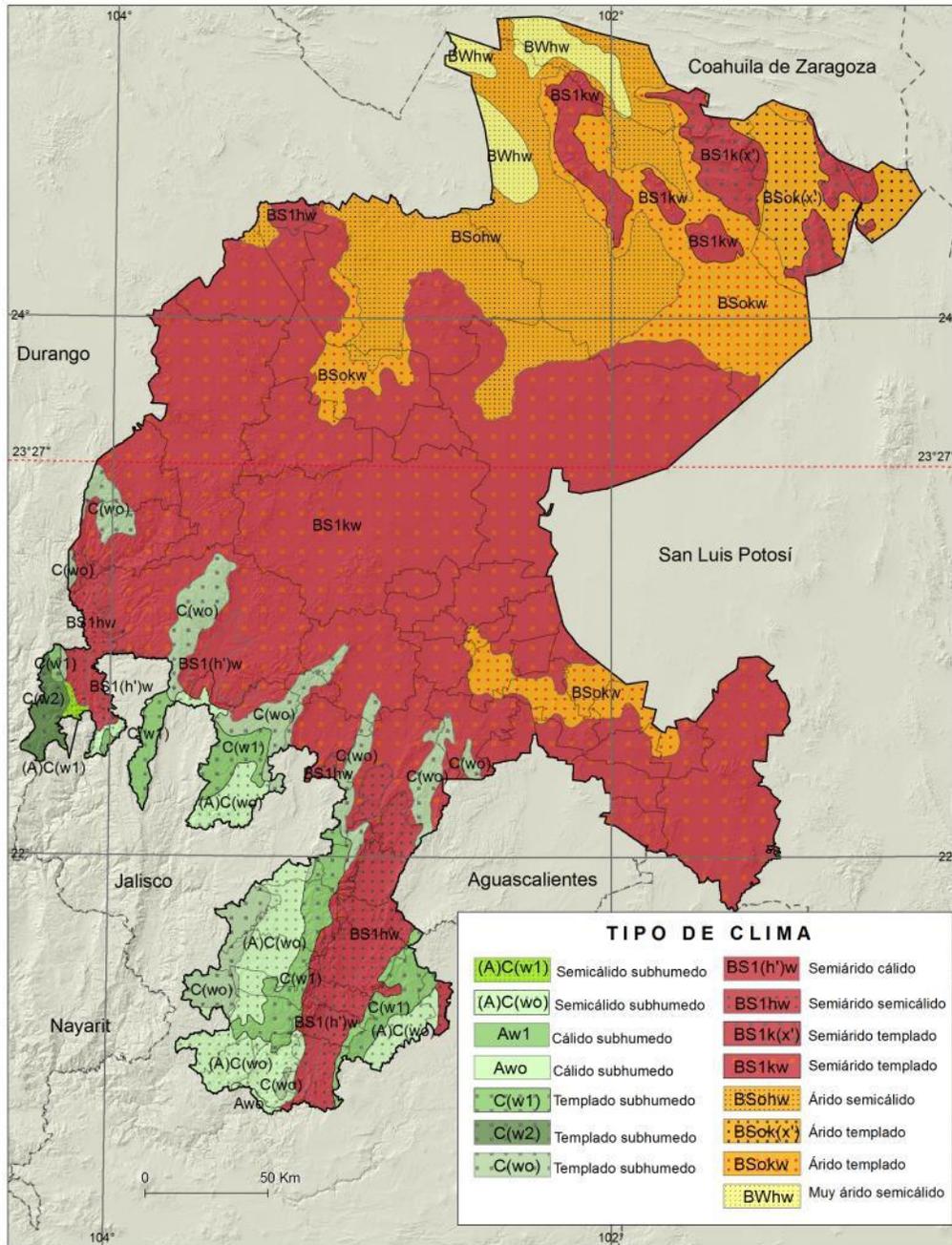
La información aportada por la Figura 2.3 indica que la precipitación anual oscila entre 200 (muy escasa) y hasta 1000 milímetros (abundante). Su distribución está influenciada visiblemente por la altitud y este parámetro depende del relieve; de manera que mientras más al norte del Trópico de Cáncer la lluvia tiende a disminuir. No obstante, las alturas de las sierras Hojasenal y Astilleros provocan un repunte, gracias al cual en sus alrededores se registran entre 500 y 600 mm. La mayor concentración de lluvia se reporta sobre la sierra Madre Occidental, en particular al sur de la entidad (800 a 1000 mm) donde ésta converge con la Sierra de Morrones. Si se dejan de lado los extremos se tendrá un promedio de 534 mm anuales, valor más bien moderado pero típico de las características geográficas de esta entidad federativa (INEGI, 2015).

En lo que respecta a la distribución de temperatura media anual, la mayor parte del territorio es templado, se encuentra entre 12 a 18 °C. La parte sur es cálida con una oscilación de 22 a 26 °C; sin embargo, se trata de áreas de tamaño relativamente reducido. Mientras que en el norte es semicálido, las temperaturas van de 18 a 22 °C. Estas tres divisiones de temperatura se pueden apreciar en la Figura 2.4.

Los valores anteriores dan un contexto adecuado para resumir los tres grandes grupos de climas que alberga la entidad. El primero corresponde a los semicálidos subhúmedos ((A)C(w₁) y (A)C(w₀)) y cálidos húmedos (Aw₁ y Aw₀) que representan 12.7 % del total de la entidad, estos se ubican en una pequeña porción al sureste; el segundo contempla a los templados subhúmedos (C(w₁), C(w₂) y C(w₀)) concentrados sobre las sierras y mesetas que bordean el suroeste, ellos constituyen apenas el 4.1 %; y, finalmente, el tercer grupo está conformado por los secos (B), los cuales se subdividen en semiáridos con tres variedades: templados (BS1kw, BS1k(x')), semicálidos (BS1hw) y cálidos (BS1(h')w); estos se juntan a lo largo de todo el estado, particularmente en el centro, también en este grupo se encuentran áridos con tres tipos: templados (BS0kw y BS0k(x)), semicálidos (BS0hw) y muy árido semicálido (BWhw). Este último conjunto abarca el 83.2 % de la zona de interés. Es preciso indicar que en general el régimen de lluvias es en verano (w), como se observa al revisar la Figura 2.5.

De los tipos de clima antes puntualizados, tres de ellos representan 72.8 % de Zacatecas, estos son: el semiárido templado (BS1kw) que cubre 42.34 %, éste se visualiza como una franja desde el sur que se amplía y cubre el centro de la entidad hasta el norte donde lo delimitan el árido templado (BS0kw) y árido semicálido (BS0hw); sin embargo, en las serranías del norte es posible observarlo. El segundo clima en importancia por la superficie que ocupa es el árido semicálido (BS0hw), el cual se esparce por 17 % de la entidad y como ya se mencionó se encuentra en la porción norte. Por último, está el muy árido semicálido (BWhw) con 13.5 % que se restringe al noroeste.

La conclusión de mayor relevancia al respecto del clima en el estado de Zacatecas es la realidad de que 83.2 % de su superficie registra condiciones climáticas correspondientes de semiáridas a muy árida, hecho que en buena medida será indicativo de las posibilidades agrícolas de esta entidad, tal y como se revisará más adelante.



Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO, portal de geoinformación, Climas 1:1000000. Autor: García, E. (1998)

Figura 2.5 Distribución de tipos climas en Zacatecas

2.1.3 Unidad de suelo dominante

La agricultura no podría haberse desarrollado sin el sustento del recurso suelo, pues es aquí donde comienza la germinación. Los diferentes tipos van a significar un mayor o menor potencial para el desarrollo de los cultivos. Es un factor fundamental para conseguir cosechas abundantes.

Como se puede ver en la Figura 2.6 son 14 las unidades dominantes; de éstas, la que predomina con el 38.87 % del total de superficie estatal es el Xerosol, concentrado en el noreste. Si se suma con el Litosol (14.3 %), Feozem (14.4 %) y Regosol (12.3 %), resultará una cobertura cercana al 80 % del estado (Cuadro 2.1).

En relación con su aptitud para la agricultura tanto el Xerosol como el Litosol dependen de la presencia y disponibilidad de agua. Mientras tanto el Regosol va a depender de la profundidad y pedregosidad. Finalmente, debe señalarse que las mejores condiciones para siembra es el Feozem; el cual, además, representa una extensión importante dedicada a la agricultura de riego o temporal, ya sea para granos, legumbres u hortalizas, asegurando rendimientos altos.

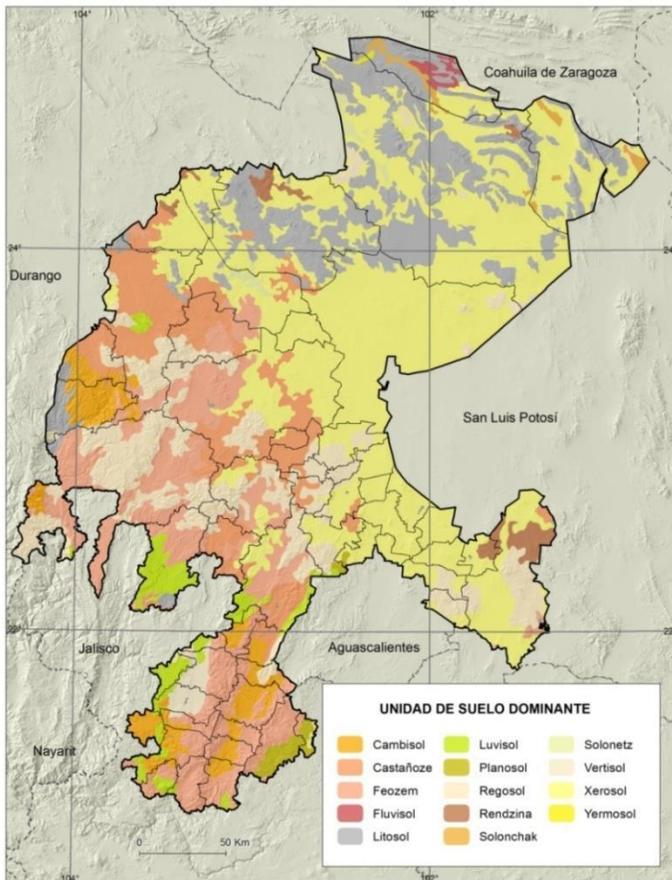


Figura 2.6 Unidades de suelo dominantes en Zacatecas

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI, conjunto de datos Edafológicos Vectoriales 1:1 000 000

Cuadro 2.1 Características y actitud agrícola de suelos dominante en Zacatecas

Unidad de suelo	Características	Actitud agrícola	% del territorio estatal
Yermosol	Suelos de zonas áridas con contenido bajo de materia orgánica.	En condiciones de suficiencia de agua y fertilización adecuada pueden sostener una elevada producción agrícola.	0.04
Fluvisol	Suelos de origen aluvial reciente.	Son desde muy fértiles hasta infértiles. Los cultivos en las zonas fértiles dependen más del clima que de las características del suelo.	0.32
Solonetz	Son suelos con alto contenido de sodio, magnesio o ambos.	Son prácticamente irreparables, algunos pueden soportar pastos.	0.47
Solonchak	Suelos con horizonte sálico o elevado contenido de sal en alguna de sus capas.	En estado natural son aptos para actividades agrícolas, pero requieren de lavado intenso o destinarse a pastizales.	0.48
Planosol	Suelos asociados a terrenos llanos con drenaje deficiente	Algunos de los subgrupos son buenos para la practicultura; pueden destinarse a cultivos de raíces someras. Son suelos muy susceptibles a erosionarse.	0.69
Vertisol	Suelos de textura arcillosa y pesada que se agrietan notablemente cuando se secan.	Tienen dificultades en su labranza, pero son adecuados para una gran variedad de cultivos siempre y cuando se controle la cantidad de agua para que no se inunden o se sequen; si el agua de riego es de mala calidad pueden salinizarse o alcalinizarse. En su estado natural son muy buenos para pastos y cultivos de temporal.	0.78
Rendzina	Cuentan con una capa superficial abundante en materia orgánica y fértil que descansa sobre roca caliza o materiales ricos en cal; son suelos arcillosos y poco profundos.	De fertilidad alta con cultivos de raíces someras.	1.27
Luisol	Suelos ricos en nutrientes y muy susceptibles a erosión.	Se destinan principalmente a la agricultura con rendimientos moderados.	2.72
Cambisol	Suelos jóvenes, poco desarrollados. Se caracterizan por presentar en el subsuelo una capa con terrones que presentan vestigios del tipo de roca subyacente y que, además, puede tener pequeñas acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, fierro o manganeso.	Adecuados con productividad media a alta.	4.07

Unidad de suelo	Características	Actitud agrícola	% del territorio estatal
Castañosem	Suelos alcalinos que se encuentran ubicados en zonas semiáridas o de transición hacia climas más lluviosos como las sierras y llanuras del norte de Zacatecas. Rico en materia orgánica y nutrientes, con acumulación de caliche suelto o ligeramente cementado en el subsuelo	En México se usan para el cultivo de granos, oleaginosas y hortalizas con rendimientos generalmente altos, sobre todo si están bajo riego, pues son suelos con alta fertilidad natural. Son moderadamente susceptibles a la erosión.	9.62
Regosol	Suelos formados por material suelto que no sea aluvial reciente como dunas, ceniza volcánica, etcétera.	Su fertilidad es variable y su productividad está condicionada a la profundidad y pedregosidad.	12.29
Feozem	Cuentan con una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes.	Se utilizan para la agricultura de riego o temporal, de granos, legumbres u hortalizas, con rendimientos altos.	14.04
Litosol	Son los suelos más abundantes del país, los cuales tienen menos de 10 cm de espesor sobre roca o tepetate.	No aptos para cultivo de ningún tipo. Pueden destinarse a pastoreo; sin embargo, en el país, en algunos casos se destinan al cultivo de maíz o el nopal, condicionado la presencia de suficiente agua	14.33
Xerosol	Suelos propios de zonas áridas con un contenido de materia orgánica moderado. Son el tercer tipo de suelo en el territorio nacional.	En condiciones de disponibilidad de agua son capaces de una elevada producción agrícola.	38.87
			100

Fuente: INEGI (2004) y Aguilera (1989)

2.1.4 Hidrografía

Una consecuencia directa de los limitados volúmenes de precipitación en el estado es la carencia de ríos amplios, extensos y permanentes. Los cauces existentes en su mayor parte transportan corrientes intermitentes y estarán presentes como escurrimientos de las montañas y limitados a la época de lluvias (Estado de Zacatecas, s. f.: 24).

La red hidrológica estatal deriva básicamente de dos vertientes: la primera se encuentra al norte, cuyas corrientes pertenecen a las Regiones Hidrológicas (RH) del Nazas-Aguanaval (RH36, que cubre el 22.94 % del territorio) y el Salado (RH37, con 39.8 %), y la segunda vertiente al sur, la cual dirige sus aguas al Océano Pacífico transitando por las regiones Presidio-San Pedro (RH11 con 3.63 %) y Lerma-Santiago (RH12 con 33.56 %).

La Figura 2.7 ubica la vertiente norte destacando el río Aguanaval, así como el Río Grande o de Nieves a lo largo de 475 kilómetros, de los cuales aproximadamente la mitad (223 km) corresponden al estado de Zacatecas (RH36). Este último drena las aguas del noroeste; mientras que en la otra porción (RH37) no se observan cursos de agua superficial por ser una cuenca endorreica. Además de lo anterior, sus corrientes se caracterizan por ser temporales y poco caudalosas, desapareciendo en las llanuras por efecto de infiltración.

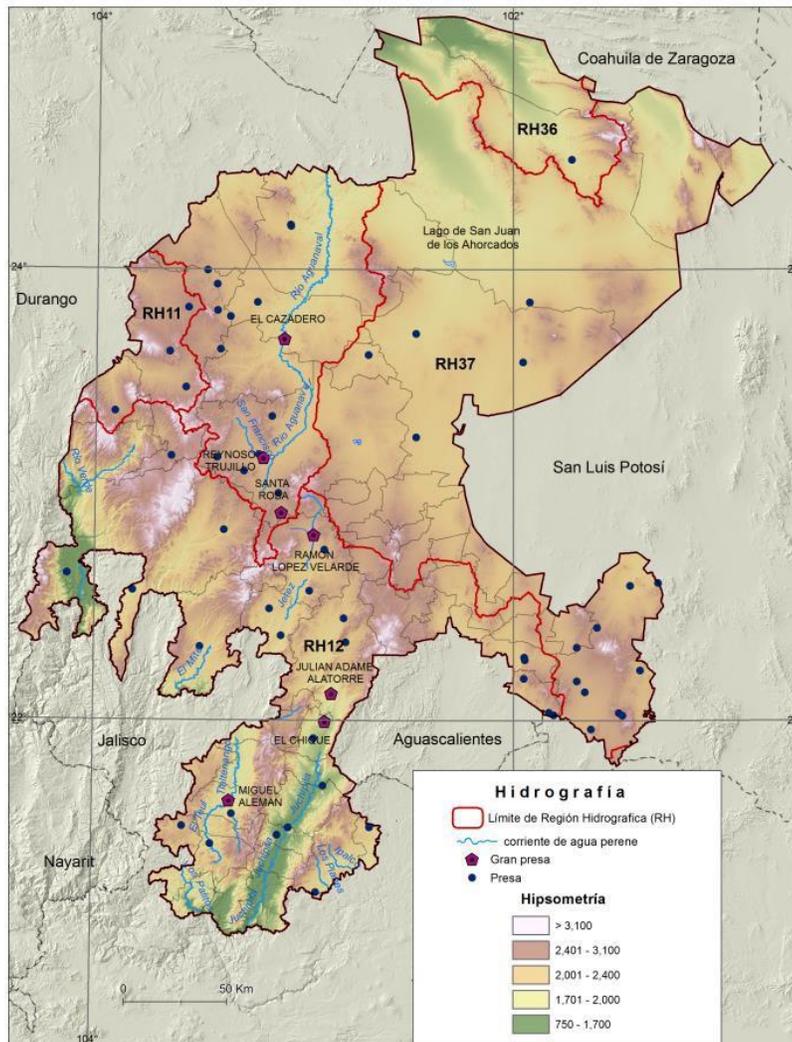


Figura 2.7 Hidrografía en Zacatecas

Fuente: Elaboración propia con datos CONAGUA, 2016. Sistema de consulta de cuencas Hidrográficas de México

Por otra parte, al Sur es posible ver ríos importantes como el Juchipila y el Tlatenago (RH12), los cuales confluyen en el Río Grande de Santiago, ya en el estado de Jalisco. En tanto, en el oeste la RH11 se distingue por influir poco dentro del territorio zacatecano, ya que drena una mínima superficie de este y beneficia un bajo porcentaje de su población. Sus afluentes logran llegar al Río San Pedro, en Durango, donde van a desembocar al Océano Pacífico.

La reducida presencia de corrientes de agua permanentes da como resultado la presencia de infraestructura hidráulica variada. Dentro del estado se encuentran siete grandes presas¹; tal y como se aprecia en la Figura 2.7 su localización sigue las corrientes superficiales; así la RH12 (Lerma-Santiago) es donde existen mayor número de presas, estas son: El Chique, Miguel Alemán, Julián Adame Alatorre y Ramón López Velarde, la primera cuenta con la mayor capacidad (193.95 hm³) y mayor volumen útil de todo el estado. Los tres restantes: El Cazadero, Santa Rosa y Gobernador Leobardo están dentro de la RH36, el Cuadro 2.2² resume las características de las obras.

En los párrafos anteriores se mencionó que la mayoría del territorio zacatecano se localiza en zonas semiáridas. "En consecuencia, sus principales ciudades dependen completamente de las aguas subterráneas para satisfacer tanto las necesidades de consumo humano como las actividades agropecuarias, uso industrial o de servicios" (Banco Mundial, 2011: 36).

En el estado se extraen 1 165 587 hm³, mediante el aprovechamiento de 8227 pozos, de los cuales el 86 % se destinan a la agricultura y 14 % quedan disponibles para los demás usos. Adicionalmente se cuenta con 34 acuíferos, pero 15 de ellos presentan diferentes niveles de sobreexplotación.

A partir de la Figura 2.8 se puede afirmar que en su mayor parte los acuíferos se concentran sobre la zona centro-oriente donde predominan climas secos. Gracias a su presencia en esa región se localizan los asentamientos de población más importantes, como son Zacatecas, Guadalupe y Fresnillo. En esos tres municipios se concentra la tercera parte del total de habitantes (INEGI: 2011).

¹La presa debe tener por lo menos 15 metros de altura en la cortina o de 10 a 15 metros con un volumen de almacenamiento mayor a 3 hm³ (CONAGUA, 2014: 82).

²En el Cuadro 2.2 se emplean las siguientes abreviaturas: "G": generación de energía eléctrica; "I" para irrigación; "C" para control de avenidas; "NAMO" para el nivel de aguas máximas ordinarias.

Cuadro 2.2 Características de "Grandes presas" en Zacatecas

Nombre oficial	El Chique	Gobernador Leobardo	Miguel Alem	Julián Adame Alatorre	Ramon López Velarde	El Cazadero	Santa Rosa
Nombre común	El Chique	Reynos o Trujillo	Excámé	Tayahua	Boca del Tesorero	El Cazadero	Santa Rosa
Capacidad al NAMO (hm ³)	139.95	118.07	71.61	34.48	27.00	26.85	11.36
Altura de la cortina (m)	61.00	40.34	48.00	54.30	30.00	27.12	15.00
Año de termino	1992	1949	1949	1976	1975	1964	1937
RHA	Lerma-Santiago-Pacífico	Cuencas Centrales del Norte	Lerma-Santiago-Pacífico	Lerma-Santiago-Pacífico	Lerma-Santiago-Pacífico	Cuencas Centrales del Norte	Cuencas Centrales del Norte
Usos	I	I	G, I, C	I	I	I	I
Corriente donde se ubica	Río Juchipila	Río Los Lazos	Río Tlaltenango	Río Juchipila	Río Jerez	Río Aguanaval	Arroyo El Arenal
Volumen útil 2014 (hm ³)	82.31	67.54	52.18	29.00	22.29	22.05	9.71

Fuente: CONAGUA, 2014

En lo referente a la distribución por uso consuntivo del agua en el estado, al igual que a nivel nacional, el mayor porcentaje es para uso agrícola con 89 %, seguido por el abastecimiento público 8 % y finalmente 3 % está vinculado a otros rubros, como el agroindustrial, servicios, industrial y comercio (industria autoabastecida). La Figura 2.9 es útil para resumir esa información.

En este sentido y dadas las características hídricas locales (con escasas corrientes superficiales), la principal fuente de abastecimiento son mantos subterráneos con 77.5 % del total de usos. Así, la industria autoabastecida es la más dependiente, ya que 98.5 % del agua que utiliza proviene de esta fuente.

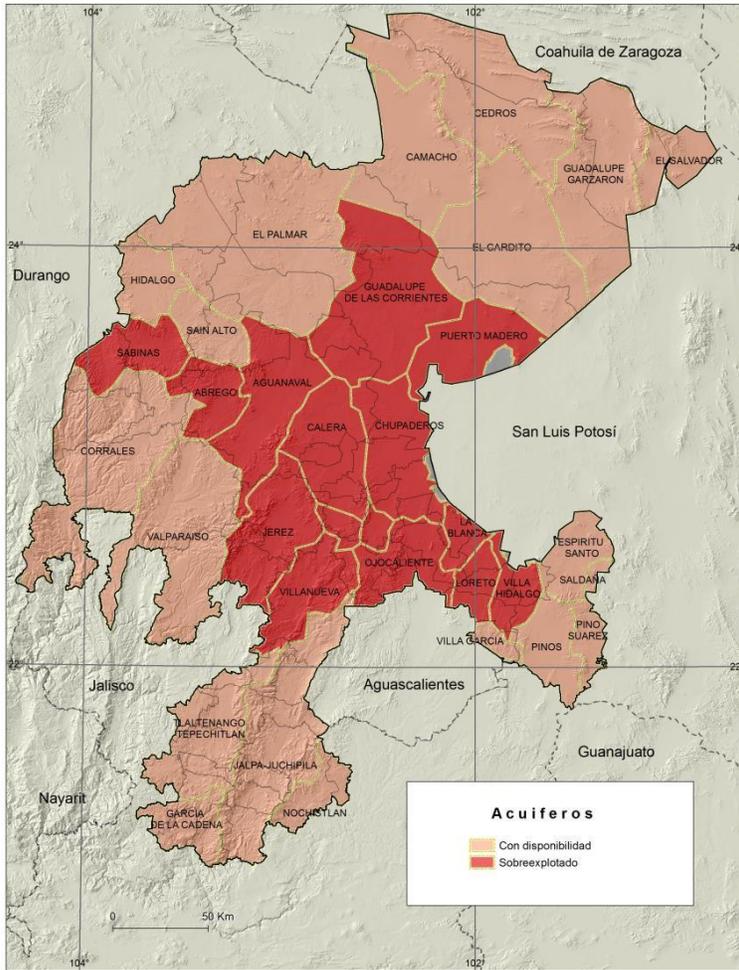


Figura 2.8 Disponibilidad de acuíferos

Fuente: CONAGUA, 2014

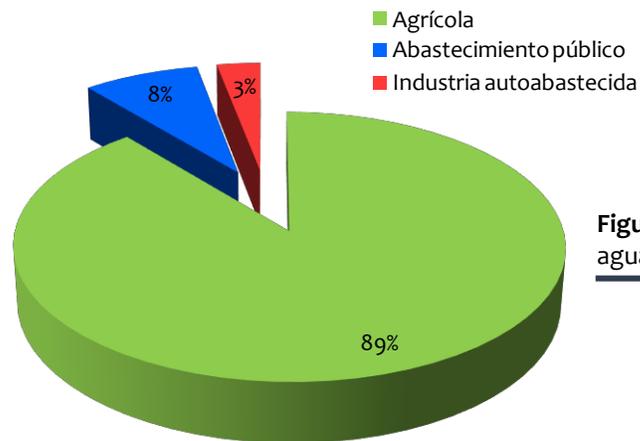


Figura 2.9 Usos consuntivos del agua en Zacatecas ($\text{hm}^3/\text{año}$)

Fuente: CONAGUA, 2013

Cuadro 2.3 Fuente de abastecimiento de usos
consuntivos (hm³/año)

Tipo de consumo	Total	Superficial	Subterránea
Agrícola	1,368.6	337.9	1,030.7
Abastecimiento público	117.2	6.3	110.9
Industria autoabastecida ³	48.0	0.8	47.3
Total	1,533.8	345.0	1,188.9
Porcentaje	100.0	22.5	77.5

Fuente: CONAGUA, 2013

Tal y como se sintetiza en el Cuadro 2.3, al respecto de esta entidad federativa se observa que en cuestiones hídricas “[...] la principal amenaza está relacionada con la sobreexplotación de aguas subterráneas y la modificación del terreno en la superficie por el crecimiento de la minería y, con ella, también el incremento de población que demanda bienes y servicios” (CONANP, 2014: 23).

2.1.5 Uso de suelo y vegetación

La cubierta del suelo y el uso de este son el resultado de la integración de los diversos factores mencionados anteriormente (relieve, clima, etcétera). En este sentido es posible observar cómo se modifica la cobertura de tierras dentro del estado, en especial en el sentido sur a norte. De esa forma se encuentra desde una reducida porción de selva baja caducifolia o bosque tropical caducifolio (en el extremo sur de la Sierra Madre Occidental) hasta amplios matorrales al noreste tal y como se ilustra mediante la Figura 2.10.

La mayor porción del territorio está ocupada por vegetación de matorral, ya que estas comunidades se han adaptado a una precipitación relativamente escasa y temperaturas elevadas, combinación típica de los climas secos. Una consecuencia de lo anterior es el paisaje caracterizado por árboles bajos o arbustos de hojas pequeñas, con o sin espinas; estos a su vez interactúan con plantas carnosas como Opuntias, Equinocactus, Ferocactus, Mammillarias y otras en forma de roseta. Algunos ejemplos típicos son: izotales, magueyales y lechuguillas. Por lo tanto, Zacatecas cuenta con amplios espacios de matorral desértico micrófilo, matorral

³ Agroindustrial, servicios, industrial, comercio.

crasicaule y de matorral desértico rosetófilo, Figura 2.11.

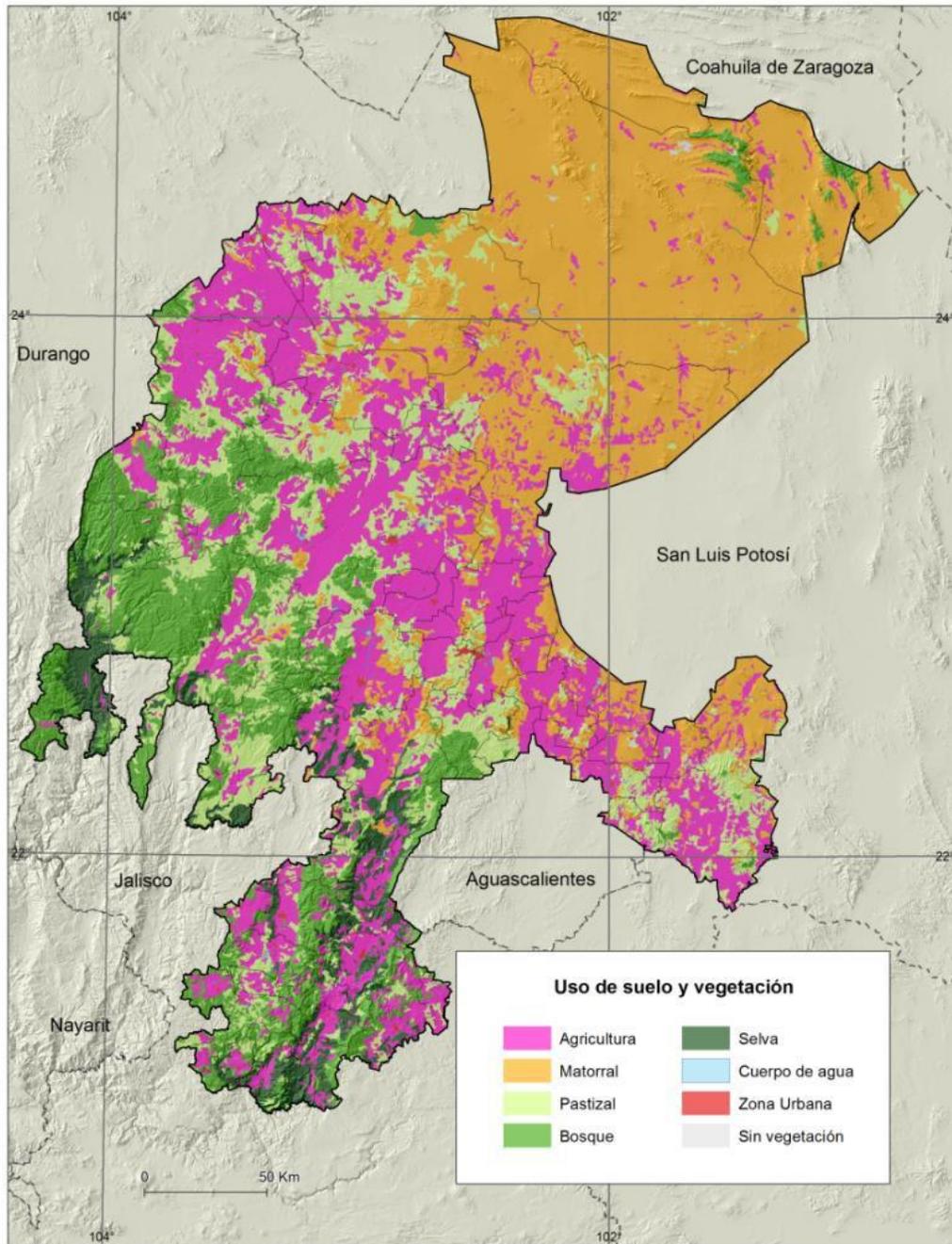


Figura 2.10 Uso de suelo y vegetación en Zacatecas

Fuente: Elaboración propia con datos INEGI, *Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación Escala 1: 250 000, serie V.*



a) *Yucca*



b) Mezquite y *opuntia*

Figura 2.11 Matorral desértico en el norte de Zacatecas

Fuente: E. Segundo, marzo de 2017

La porción suroeste difiere ampliamente respecto al extremo noreste en lo que a vegetación respecta. Las condiciones particulares de la Sierra Madre Occidental, además de encontrarse aun en zona intertropical, favorecen encontrar pequeñas porciones de selva baja caducifolia y subcaducifolia en las serranías del sur “[...] que se desarrollan en suelos pedregosos sobre laderas de cerros, principalmente en cañones y cañadas. Se asocia con climas cálidos y semicálidos, con dominancia en su fisonomía de plantas arbóreas con menos de 15 m de altura y pérdida de sus hojas durante la época seca del año” (Balleza y Villaseñor 2002: 12).

En lo que respecta a la vegetación de bosque, ésta se ubica en altitudes superiores a los 1500 msnm; está formada por bosque de pino, encino o mixtos. Se concentran al suroeste mientras al sur destaca la población de *Pinus maximartinezii*, especie endémica de Zacatecas (*ibíd.*). A su vez los pastizales se observan dispersos por todo el estado, siempre entre los 1700 y 2600 msnm, como un indicador de la presencia de drenaje deficiente y suelos pobres con exceso de sales (CONANP, *op. cit.*). Hacia el centro de la entidad dan un preámbulo a la presencia de zonas agrícolas, mientras al norte se mezclan con comunidades de matorral.

2.2 Producción agrícola en México

El supuesto hipotético que sustenta la presente investigación busca relacionar la intensidad de una sequía con la afectación sufrida por los cultivos, en un lugar determinado del territorio nacional, en este caso el estado de Zacatecas. Por lo anterior, primero viene al caso identificar y analizar las generalidades de la producción en el agro mexicano para buscar después una asociación directa entre ambos elementos.

A manera de referencia conviene plantear un par de conceptos que aporta el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), Organismo descentralizado de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) encargado de aportar información oficial sobre el campo mexicano. En primer lugar, para esta institución, “... la agricultura (del latín *agricultūra*; de *ager, agri*, campo, y *cultūra*, cultivo: labranza o cultivo de la tierra) es el conjunto de técnicas y conocimientos para cultivar la tierra. Dentro de los sectores económicos se clasifica dentro del sector primario, junto a actividades como la ganadería, silvicultura, caza y pesca (SAGARPA, s. f.: 50).

La misma fuente establece: “Los dos objetivos fundamentales para practicar la agricultura son: a) obtener los mayores rendimientos y b) devolver las sustancias alimenticias a las plantas, sin lo cual no hay mejora de terrenos, desciende la productividad y no se logra la sustentabilidad. Estos objetivos deben ir acompañados de conocimientos teóricos y prácticos sobre el uso y manejo de las tierras, el influjo de la meteorología, la naturaleza de los abonos y sus aplicaciones sobre las diferentes especies de árboles, arbustos y hortalizas,

el cultivo de los prados, la producción de semillas y cereales, entre otros más” (*ibíd.*). Por nuestra parte es importante mencionar que la metodología propuesta aquí, relativa a la actividad agrícola, tiene como finalidad postular procedimientos que permitan:

- Dimensionar la superficie sembrada, así como la cosechada.
- Calcular y caracterizar la producción obtenida en áreas de temporal.
- Centrar el análisis de los dos parámetros anteriores en el ciclo primavera-verano.
- Caracterizar la superficie agrícola siniestrada
- En una última etapa, relacionar superficie siniestrada con la intensidad de la sequía enfrentada en 2011.

Los elementos anteriores se presentan como objetivos específicos, resultado de tres elementos de decisión: primero, las recomendaciones recibidas luego de consultar a especialistas en estas temáticas; después, a partir de algunos lineamientos recabados en varios de los trabajos revisados en la bibliografía; en tercer lugar, de los conocimientos propios sobre el tema y el área de estudio.

Es necesario precisar que en este capítulo se desarrolla primero en la escala nacional, mientras que después se detallan las circunstancias estatales de Zacatecas. Mediante este orden se facilitó dimensionar la circunstancia agrícola para esa entidad federativa dentro del marco nacional, destacando su papel protagónico entre los principales productores agrícolas del país.

2.2.1 Bancos de datos y variables sobre producción agrícola

Para la presente investigación se aprovecharon los acervos en formato digital del portal del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2016), organismo desconcentrado de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).

Se mencionó, ya que para determinar los parámetros a elegir fue necesario revisar con cuidado diversos marcos conceptuales; valorar a detalle las recomendaciones de expertos; además de guiarse por la propia experiencia y trabajo de campo. Todo lo anterior ante el hecho de que para cada estado y sus municipios la información oficial ofrece abundante cantidad de registros sobre volumen de producción y de dos indicadores de referencia (rendimiento y precio medio rural por producto).

Para empezar, conviene conceptualizar el término de “Año Agrícola”, ya que dentro de su duración se insertan otros lapsos temporales de trascendencia. Al respecto, SIAP define el Año Agrícola como “[...] periodo de 18 meses que resulta de la adición de las siembras y cosechas que se realizan en los ciclos agrícolas otoño-invierno (OI) y primavera-verano (PV). Abarca por tanto octubre-diciembre de un año, más el siguiente completo y enero-marzo del año subsecuente” (SAGARPA, s. f.: 52).

Para la mejor comprensión de los diferentes componentes de ese “Año” la misma fuente propone los elementos que se muestran en el Cuadro 2.4 donde se integran todos los ciclos agrícolas, así como los cultivos perennes, con la inclusión de los perennes especiales. Como se puede observar es factible contar con un elevado número de variables para contabilizar la producción agrícola de México. Sin embargo, viene al caso recordar que únicamente se cuantificarán tres parámetros básicos para el presente estudio: la superficie agrícola sembrada, la superficie cosechada y la superficie siniestrada; siempre en el ámbito de las cosechas obtenidas en tierras de temporal durante el ciclo primavera-verano.

Cuadro 2.4 Estructura del “Año Agrícola”
ejemplificado para tres años “t”



Fuente: SAGARPA (s.f.: 53)

Ante la importancia que esas variables representan para la investigación, se exponen en seguida una serie de generalidades sobre las mismas.

2.2.2 Superficie agrícola cosechada y regiones productoras

De acuerdo con fuentes oficiales la República Mexicana tiene una superficie continental que abarca 1 960 189 km² (INEGI, 2016), equivalentes a poco más de 196 millones de hectáreas. De acuerdo con el SIAP, en el año 2014 de esa extensión se obtuvieron 319 cultivos diferentes. Tal y como aparece en el Cuadro 2.4, ese elevado número de productos pertenecen tanto a cultivos de periodo corto (cíclicos) como a otros cuya recolección rebasa el año calendario (perennes). Todos ellos se generaron en una superficie de 22 millones de hectáreas (SIAP, 2016) equivalentes a 222 000 km². Las cifras anteriores reflejan el limitado alcance geográfico de esta actividad primaria, ya que apenas ocupa poco más del 11 % del territorio nacional.

Para analizar la producción agrícola del país se podría tomar como base de referencia la superficie sembrada. Sin embargo, esa variable puede ser poco representativa de la realidad productiva estatal ante la siniestralidad que suele afectar los cultivos. Es necesario contar con otro parámetro que ofrezca mayor precisión; para ese objeto se consideró la superficie cosechada, pues es en ella donde se obtienen los productos.

A partir de ese parámetro de referencia (la superficie cosechada), la capacidad del campo mexicano para generar cerca de 400 cultivos es indicativa de la diversidad bioclimática del país. La afirmación anterior, si bien es cierta, viene a ser un tanto relativa, ya que 80 % de la superficie está ocupada por tan sólo diez cultivos. De ellos apenas cinco son para consumo humano (maíz grano, frijol, caña de azúcar, trigo grano y café cereza). Los demás (pastos, sorgo grano, avena forrajera, maíz forrajero y alfalfa verde) se destinan de manera mayoritaria a la alimentación de ganado (*ibíd.*).

Si se considera de nueva cuenta el año agrícola 2014 en términos de cultivos cíclicos y perennes, incluyendo tierras de temporal y de riego, se encontró que nueve estados reportaron más de un millón de hectáreas cosechadas, valor equivalente al 54 % del acumulado nacional.

En ese año el estado de Jalisco ocupó el primer lugar (7.2 % del total nacional), pero a lo largo del último lustro esa entidad junto con Veracruz, Chiapas, Oaxaca, Tamaulipas, Sinaloa, Zacatecas, Michoacán y Chihuahua han permanecido como productores de primera importancia, al contar con las zonas de cultivo más extensas (*ibíd.*). Ahora bien, incorporando otros cinco casos estatales se obtendrá el 75 % de la superficie cosechada, mientras el 25 % restante se dispersó entre las 18 entidades restantes, razón por la cual el potencial agrícola de estas últimas puede calificarse como modesto, tal y como lo evidencia la Figura 2.12



Figura 2.12 Clasificación de entidades federativas por extensión de superficie agrícola cosechada, 2014

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2016

La Figura 2.12 también permite identificar cuatro grandes regiones productoras. La primera está al norte formada por Sinaloa y Chihuahua; otra en el sur con Oaxaca y Chiapas; la tercera incluye a Tamaulipas y Veracruz sobre el Golfo de México y, finalmente, una cuarta formada con Jalisco, Michoacán y Zacatecas. La jerarquía demostrada por este último caso estatal representó uno de los factores de mayor significación para considerarlo como área de estudio para esta investigación.

2.2.3 Superficie agrícola de riego y de temporal

En el apartado 1.2.2 se mencionó que las zonas de cultivo representan poco más del 11 % de las 196 millones de hectáreas del ámbito continental de la República Mexicana. De entrada, se trata de una proporción significativamente reducida y pueden plantearse dos factores básicos para explicarlo. El primero es el hecho de que prácticamente la mitad del territorio nacional se localiza en zonas donde predominan diversos grados de climas secos y semi-secos (CONAGUA-SMN: s. f.); el segundo deriva de la presencia de un relieve desfavorable para el cultivo. En este último sentido, la presencia de diversos tipos de bosques, los cuales cubren 21 % del país, indica una pendiente significativa e impropia para la labor. De igual manera la existencia de matorral xerófito en cerca de la tercera parte de México, igual que otros tipos de vegetación relativamente similares (3 % de la superficie nacional) son demostrativos de suelos con baja vocación agrícola. De esta forma resulta que aproximadamente 56 % del territorio es poco adecuado para la actividad agrícola.

Por otra parte, los estados ubicados en la porción norte son los más extensos, pero también reciben una cantidad de precipitación pluvial poco abundante. Es el caso de Baja California Sur, donde 99 % de su territorio enfrenta climas semisecos, secos o muy secos. Algo similar se tiene en Coahuila, Sonora y en Baja California, donde más del 93 % de su superficie recibe lluvias muy escasas en el año (INEGI, s. f.: b).

A pesar de esas limitantes naturales, mediante infraestructura y tecnología es posible proveer de agua a los lugares más secos aprovechando mantos subterráneos. Como ya se mencionó, así ocurre en Baja California Sur, donde la totalidad de sus cosechas proceden de tierras con riego, situación parecida a la de Baja California (98 %) y Sonora (93 %), vecinos entre sí, en la región noroeste de México (SIAP, op. cit.). Por el contrario, los estados más húmedos situados al sureste y sobre la península de Yucatán requieren poco riego para sostener sus cultivos. Menos del 10 % de su superficie agrícola cuenta con este recurso, lo cual se explica también por la poca importancia que tienen en términos agrícolas.

Las estadísticas oficiales reportaron para el 2014 una superficie cosechada de 21.2 millones de hectáreas, tanto de cultivos cíclicos de periodo corto, como de perennes. De esa cantidad, 26.9 % (5.7 millones de hectáreas) contaban con equipamiento para riego, mientras que el 73.1 % restante (15.5 millones de hectáreas) estaban sujetas a los vaivenes de las lluvias de temporal.

Para mayor detalle, la Figura 2.13 facilita apreciar el peso significativo que representa el riego y el temporal en cada estado del país. En particular, se destacan algunos de los estados del norte con menores registros de lluvias por el empleo significativo que hacen del regadío. Por el contrario, sobre la porción opuesta del país las cosechas dependen de manera esencial del temporal, mayormente asegurado ante el clima cálido y semihúmedo predominante.

A pesar de esos patrones generales, la figura referida también permite ubicar una importante infraestructura para riego en regiones con precipitación pluvial relativamente abundante. Así ocurre en el Bajío, donde 47 % de las tierras cultivadas de Guanajuato cuentan con riego, situación similar a la de su vecino, Michoacán; el cual aprovecha sistemas de regadío en 40 % de su superficie agrícola.

De igual manera la cartografía descrita demuestra que a pesar de su importancia como productor, el estado de Zacatecas depende de manera preponderante del temporal, lo cual ayuda a entender los tipos de cultivos que predominan en su territorio, tal y como se explicará con mayor detalle más adelante.

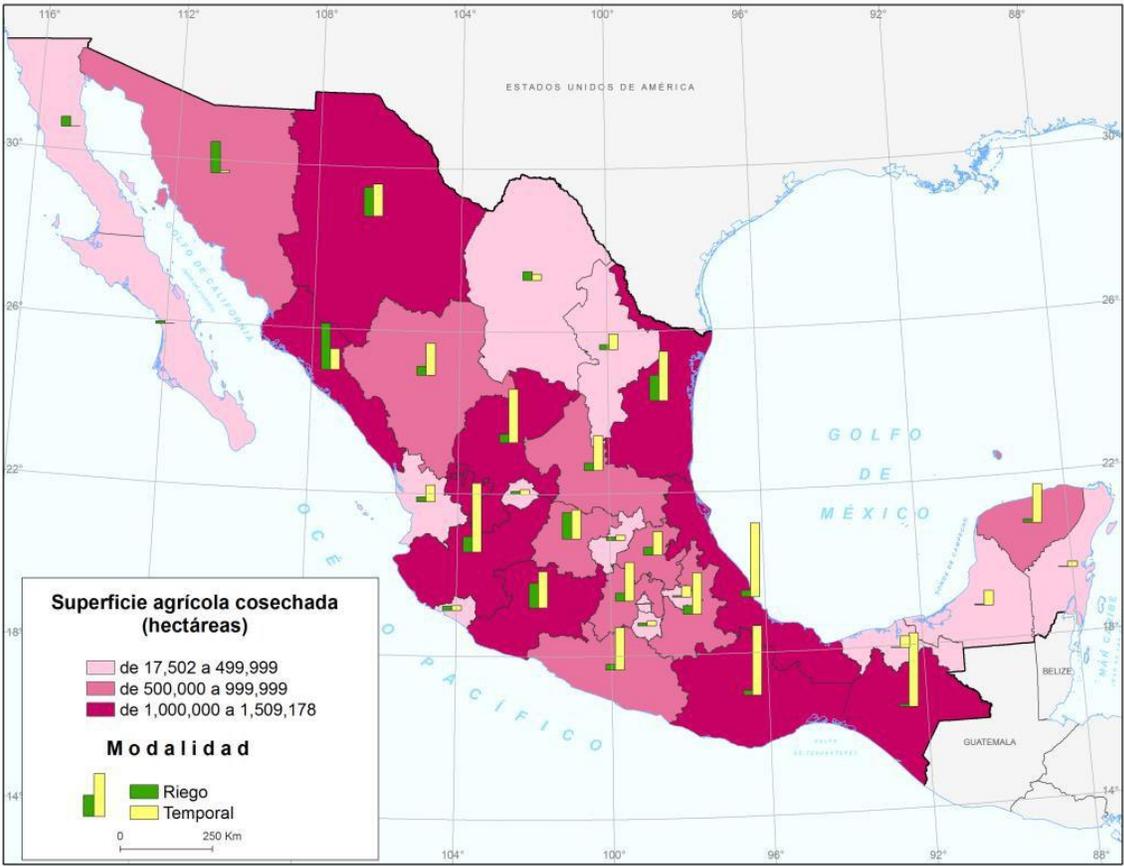


Figura 2.13 Entidades federativas: superficie agrícola cosechada y disponibilidad de riego, 2014

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2016

2.2.4 Ciclos agrícolas: otoño-invierno y primavera-verano

Dentro de la excepcional biodiversidad que se mencionó en otro apartado, el ámbito climatológico de México tiene a su favor la posibilidad de aprovechar dos ciclos agrícolas bien diferenciados. En términos de la fuente que provee los datos respectivos (SAGARPA, s. f.: 383-384), los conceptos de interés se definen de la manera siguiente:

Ciclo agrícola: periodo que comprende aquellos ciclos cuyas denominaciones se asumen a partir de las estaciones del año en que se realizan las siembras, esto es: otoño-invierno y primavera-verano. Es necesario considerar la totalidad del periodo de producción hasta que se llevan a cabo las cosechas, por lo que los ciclos se traslapan; es decir, todavía no termina un ciclo cuando inicia otro, esto es resultado de la duración de los periodos vegetativos de los cultivos.

Ciclo otoño-invierno: abarca el periodo de siembras que generalmente inicia en el mes de octubre y termina en marzo del año siguiente. Las cosechas inician en diciembre y concluyen en el mes de septiembre del año siguiente.

Ciclo primavera-verano: comprende el periodo de siembras que generalmente comienza en marzo y finaliza en septiembre del mismo año. Generalmente, las primeras cosechas de este ciclo inician en el mismo mes en que se reportan las siembras, sobre todo por la inclusión de cultivos de invernadero. Las cosechas concluyen en marzo del año subsecuente.

Es importante señalar que, en promedio, las tierras cultivadas durante el ciclo otoño-invierno únicamente representan 18 % de la superficie cosechada a nivel nacional, mientras que el de primavera-verano es el de mayor significación al alcanzar 53 % del total. Además de los anteriores, los cultivos perennes ocupan otro 29 % de la superficie restante (*ibid.*). En rigor, si se dejan de lado las estadísticas referentes a estos últimos (perennes), resultaría que el ciclo otoño-invierno produce 25 % del total de cultivos de periodo corto del país, mientras el de primavera-verano sería predominante al aportar el 75 % restante. Las cifras anteriores, indicativas de la concentración de cosechas en este último ciclo, fue el factor decisivo para tomarlo como uno de los referentes para el análisis respectivo.

La Figura 2.14 es necesaria para identificar ciertos patrones de distribución territorial, algunos de los cuales son evidentes. Así se confirma al identificar una especie de corredor agrícola que transcurre desde el norte (Chihuahua) hacia el occidente y sur del país (Puebla), abarcando ocho entidades; todas ellas superaron las 80 000 hectáreas cosechadas en el ciclo primavera-verano. Por el contrario, en la mitad sur y oriental del país es notable la poca trascendencia de este ciclo, ya que ninguno de los estados ahí ubicados obtuvo resultados de especial relevancia.

Es interesante evidenciar que este comportamiento es diferente a la distribución espacial de casos ilustrada en la Figura 2.12, la cual integra información de los dos ciclos agrícolas en conjunto (año agrícola) a la vez que incorpora la producción de perennes. Del mismo modo se confirma la pertenencia del Estado de Zacatecas a este grupo de mayores productores, de donde se sigue que la mayor parte de las cosechas en esa entidad se levantan en primavera-verano, el cual contempla desde marzo hasta el mes de octubre de cada año (ver Cuadro 2.4). Este último hecho también justificó considerar las estadísticas correspondientes al ciclo primavera-verano como parámetro central del presente estudio, ya que al dejar de lado el otro ciclo solamente se pierde una proporción relativamente menor de la producción total del estado.



Figura 2.14 Clasificación de entidades federativas por superficie agrícola cosechada del Ciclo primavera-verano, 2014

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2016

2.2.5 Superficie Agrícola Siniestrada

Para demostrar la tesis que sustenta la presente investigación es fundamental contar con datos estadísticos que permitan determinar la pérdida de cosechas. De manera específica se requiere precisar la superficie sembrada que no fue posible cosechar a causa de alguna adversidad física o de otra índole. Dentro del conjunto de parámetros numéricos existentes se encuentra la superficie siniestrada. Sin embargo, es importante recordar que esta variable sólo se encuentra en las estadísticas a nivel de ciclos. El SIAP (2016) conceptualiza esta variable de la manera siguiente:

Superficie siniestrada: área sembrada que, en el ciclo agrícola y mes de reporte, registra pérdida total por afectación de fenómenos climáticos o por plagas y enfermedades. Se contabiliza la superficie siniestrada totalmente y se identifican las causas que motivaron la pérdida. Entre los fenómenos climáticos a considerar están los siguientes: sequía, exceso de humedad, helada, bajas temperaturas, vientos, inundaciones, granizo y onda cálida.

Al respecto de la definición anterior, se considera algo común sufrir contingencias o “siniestros”, ocasionados por causas naturales como son los fenómenos hidrometeorológicos, entre los cuales se encuentra la sequía (CNSF, s. f.). Pero también conviene recordar la posibilidad de perder cultivos por circunstancias biológicas, por ejemplo, ante eventos de plagas y enfermedades de las plantas o frutos que pueden afectar de manera significativa la producción. Una tercera opción es el abandono de cosechas por decisión de los mismos productores ante contingencias socioeconómicas tales como falta de recursos de todo tipo, bajos precios del mercado, alto costo del transporte, carencia del mismo, emigración e inseguridad, por mencionar algunas de las más relevantes.

No hay forma de asegurar el éxito de una cosecha en cualquier lugar donde ésta se desarrolle. El caso de la República Mexicana de ninguna manera es la excepción. Por ejemplo, al tomar en cuenta tanto cultivos cíclicos como los perennes en un año relativamente normal (como fue 2014) y sumando tierras con riego más las de temporal, la superficie cosechada resultó inferior en poco más de un millón de hectáreas a la superficie sembrada. Esa diferencia fue equivalente a una merma del 4.7 % del total original.

Ante un fenómeno hidrometeorológico extremo, como fue la sequía registrada en 2011, se perdieron más de cuatro millones de hectáreas (18 % del área sembrada), es decir, cerca de cuatro veces lo registrado en un año reconocido como “promedio”. Con la información estadística, correspondiente al porcentaje de superficie agrícola siniestrada, se buscó una primera aproximación para localizar áreas probables de afectación por sequías.

Al considerar sólo cultivos cíclicos –sin tomar en cuenta los perennes, con mejor dotación de riego; para todo tipo de tierra de labor (riego y temporal) y del ciclo primavera-verano del año 2011– fue posible determinar cinco casos estatales que perdieron 40 % o más de sus cosechas. Este conjunto fue encabezado por Aguascalientes (67 % del total municipal), seguido por Zacatecas (56 %), Querétaro (53 %), San Luis Potosí (47 %) y Guanajuato (41 %).

La Figura 2.14 perfila con claridad la región con mayor afectación en este sentido, ubicada de manera puntual en el centro-norte del país. Es importante señalar que, en la gran sequía de 2011, Zacatecas fue el estado que perdió la mayor superficie (584 mil hectáreas sembradas) de todo el país. Por sí misma esa cifra es preocupante; sin embargo, si a manera de comparación se regresa de nuevo a un año “promedio” (como el 2014), esa misma entidad aparece de nuevo a la cabeza en términos de área siniestrada (110 mil hectáreas), aun cuando en ese año ocupó el sexto lugar en porcentaje siniestrado.

Aprovechando la Figura 2.15, donde también se incluye la proporción de tierras con riego y de temporal del ciclo primavera-verano de 2011, destaca que Guanajuato, Aguascalientes y Querétaro estuvieron entre los casos más afectados, a pesar de que la disponibilidad de regadío en ellos superó en superficie a las zonas de temporal. Al respecto de Durango y Zacatecas los siniestros fueron un tanto más lógicos, al observar que la mayor parte de sus sembradíos dependen del temporal.

La afirmación anterior se respalda con la circunstancia observada en el noroeste del territorio nacional, donde Baja California, Baja California Sur y Sonora enfrentaron pocas pérdidas en 2011, probablemente por el hecho de contar en forma mayoritaria con infraestructura para riego aun cuando cuentan con áreas de cultivo de tamaño relativamente reducido.



Figura 2.15 Superficie siniestrada en ciclo primavera-verano y disponibilidad de riego por entidad federativa, 2011

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2016

2.3 Producción agrícola en Zacatecas

La producción agrícola en Zacatecas se explicó, ya que en 2014 la producción agrícola nacional sumó 22.2 millones de hectáreas cosechadas. Por su parte, el valor de los cultivos alcanzó 417 mil millones de pesos. En esos mismos referentes Zacatecas se ubicó entre los mayores productores del país, con una superficie sembrada de 1.2 millones de hectáreas; de las cuales cosechó 1.1 millón de hectáreas, alcanzando el séptimo lugar nacional en esta última variable.

Sin embargo, las cifras indicadas antes son una mera generalización de la realidad agrícola en Zacatecas, ya que a lo largo del tiempo se reportaron variaciones más que significativas (tanto positivas como negativas) como lo indica el Cuadro 2.5. Del tabulado referido resalta que, mientras la superficie cosechada en el país se ha conservado relativamente estable (sobre las 20 millones de hectáreas), en el caso de Zacatecas se tienen variaciones mayores al 50 %. Por

ejemplo, se reportan superficies mayores de 1.2 millones de hectáreas en años como 2003, 2006 y 2013; pero también se encuentran registros por abajo de 800 mil hectáreas, como sucedió en 2005, 2008 y en 2011.

Cuadro 2.5 Participación de Zacatecas en la superficie cosechada de la República Mexicana, 2003-2014

Año	Total Nacional	Edo. de Zacatecas	Superficie Cosechada Zacatecas vs. Total Nacional (en %)	Edo. de Zacatecas	Edo. de Zacatecas
	Superficie Cosechada (miles de ha)	Superficie Cosechada (miles de ha)		Lugar Nacional en Superficie Cosechada	Valor de la producción agrícola (millones de dólares)
2003	20,118.8	1,252	6.2	5	570.9
2004	20,191.5	1,157	5.7	6	612.2
2005	18,528.5	728	3.9	13	505.2
2006	19,967.5	1,263	6.3	4	669.7
2007	20,054.6	1,088	5.4	7	662.7
2008	20,502.8	1,170	5.7	7	664.7
2009	18,666.2	854	4.6	9	777.2
2010	20,167.8	1,065	5.3	8	766.6
2011	18,093.8	539	3.0	15	601.3
2012	20,511.1	1,034	5.0	9	968.6
2013	20,711.0	1,273	6.1	5	974.1
2014	21,161.5	1,105	5.2	7	822.5

Fuente: Cálculos propios con datos del SIAP (2016) e INEGI; Banco de Información Económica (BIE), 2016

En ese último año agrícola la superficie cosechada apenas representó 42 % del máximo logrado en 2013. Con base en esos datos ya es posible afirmar que, en ocasiones, esta entidad federativa enfrenta circunstancias tan adversas que pueden llegar a convertir a la agricultura en una actividad incierta y riesgosa; argumento que fundamentó elegirlo como caso de estudio para esta investigación. Dentro de este contexto, la Figura 2.16 es útil para evidenciar los cambios significativos de Zacatecas en términos del lugar ocupado como productor agrícola a nivel nacional.

Para terminar este apartado debe enfatizarse de manera particular la primacía lograda por el estado de Zacatecas en la producción de frijol a escala nacional. En efecto, los registros del SIAP (*op. cit.*) dan cuenta de que, por lo menos de 2003 a la fecha, esta entidad federativa se ha mantenido como el principal proveedor de frijol de todo el país. De manera normal el volumen cosechado de esta oleaginosa supera en más del doble al ocupante del segundo lugar, pero en años específicos (2005, 2010 y 2011) Zacatecas apenas superó en 39 mil toneladas la cosecha de Sinaloa y de Nayarit.

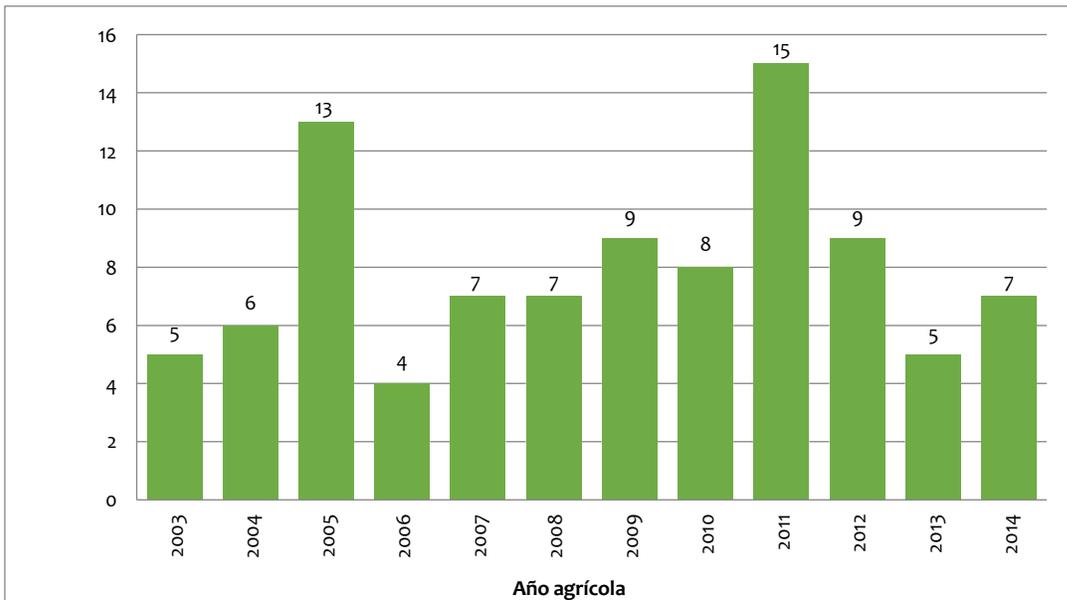


Figura 2.16 Estado de Zacatecas: lugar nacional en superficie cosechada, 2003-2014

Fuente: Cálculos propios con datos del SIAP (2016) e INEGI; Banco de Información Económica (BIE), 2016

2.3.1 Cultivos principales

En el apartado 2.1.2 relativo al clima se explicó el predominio de climas semiáridos a muy áridos en 83.2 % del territorio de Zacatecas. Desde luego, esas condiciones están asociadas con un grado importante de escasez de precipitación pluvial, carencia propia de zonas semiáridas, ya que se trata de una de las siete entidades federativas que reciben menor volumen de lluvia. Esas condiciones de cierta sequía se traducen en una fuerte limitación para desarrollar cosechas variadas, reduciéndose a sembrar aquellos productos con mejor capacidad para enfrentar la combinación de suelos y climas locales. Entre las opiniones de los expertos y la experiencia tradicional del campesinado local, se toma la decisión sobre cuáles cultivos son los más aptos para enfrentar un medio natural relativamente desfavorable.

Por esa razón se entiende que 90 % de la superficie cosechada en 2014 se concentró en solamente siete cultivos. De entrada el frijol ocupó la mitad del área, seguido por maíz en grano (16 % del total), sumando entre ambos dos terceras partes del total de las cosechas. Luego se tiene avena forrajera, maíz forrajero, chile verde, cebada en grano y tuna (*ibíd.*), sumando cerca de dos terceras partes del valor de producción.

De la misma lista, ilustrada en el Cuadro 2.6, resalta que solamente cuatro servirán para consumo humano; mientras que los restantes (avena, maíz y cebada forrajeros) se destinan con preferencia a alimentar ganado. Aparte de los anteriores, Zacatecas cosechó otros 57 productos, ninguno de los cuales resalta en términos de la superficie que ocupa, del tonelaje obtenido o por su valor monetario. Si esta base de referencia se extiende a diez cultivos, se tendrá que de los tres nuevos productos dos de ellos tampoco son para consumo humano (pastos y alfalfa verde). Así sumarán cinco para alimento humano y otros tantos para animales.

Cuadro 2.6 Estado de Zacatecas: superficie cosechada y valor de producción para cultivos principales del año agrícola 2014

	2014	2014	2014	2014	2014	2014
Cultivo	Sup. Cosechada (ha)	Sup. Cosechada (% del total)	Sup. Cosechada (% acumulado)	Valor Producción (Miles de Pesos)	Valor Producción (% del total)	Valor Producción (% acumulado)
Frijol	541,484.5	49.0	49.0	2,380,626.7	19.6	19.6
Maíz grano	178,069.0	16.1	65.1	990,295.3	8.2	27.8
Avena forrajera	110,639.0	10.0	75.1	336,535.5	2.8	30.6
Maíz forrajero	99,433.5	9.0	84.1	674,368.3	5.6	36.1
Chile verde	32,959.9	3.0	87.1	2,618,186.5	21.6	57.7
Cebada grano	22,032.0	2.0	89.1	112,554.1	0.9	58.6
Tuna	17,606.2	1.6	90.7	620,535.5	5.1	63.8
	1,105,457.0	90.7	90.7	12,130,213.6	63.8	63.8

Fuente: Cálculos propios con datos del SIAP, 2016

Esta relativa preferencia hacia el cultivo de granos en general seguramente deriva de la experiencia de los agricultores zacatecanos para obtener el mejor provecho posible de las condiciones físicas predominantes en el estado. En este entorno limitado, Zacatecas aporta el mayor volumen de frijol, alimento básico en la dieta nacional y también demandante de menor cantidad de cuidados y, en especial, resistente a condiciones de sequía.

2.3.2 Información municipal: superficie cosechada y regiones productoras

En el apartado referente a las condiciones físicas de esta entidad se explicó que las principales áreas agrícolas están delimitadas tanto por el clima como por el relieve. Este último factor es trascendente debido a que las serranías forman una especie de semicírculo que envuelve al territorio estatal en todos los sentidos, excepto al oriente, donde se encuentra una orografía moderada sólo alterada por lomeríos bajos. De esa manera las zonas planas son predominantes en la porción central y hacia los límites orientales del estado. El Mapa 2.1 (hipsometría) es un recurso útil para identificar las áreas con menor pendiente.

Por otra parte se puede afirmar que un municipio con extensión territorial reducida de igual manera dispondrá de una superficie sembrada (o cosechada) también de tamaño modesto. En contraste, los casos municipales de mayor tamaño tendrán un potencial elevado como productores, siempre y cuando estén localizados sobre la parte relativamente plana del estado, con mejores condiciones para asentar la actividad agrícola.

Son cinco los municipios destacados por su mayor tamaño (Mazapil, General Francisco R. Murguía, Concepción del Oro, Melchor Ocampo y El Salvador), se localizan al norte de esta entidad, donde la serranía dificulta desarrollar cultivos. En conjunto suman 30 % del territorio zacatecano, pero sólo aportan 5 % de la superficie cosechada. El mejor ejemplo de ellos es Mazapil, el más extenso con 12 139 km², pero representa apenas un poco más del 1 % de las cosechas. De los anteriores, General Francisco R. Murguía rompe con esa homogeneidad geográfica al aportar 3.54 % del total estatal, cifra significativamente alta comparada con sus vecinos. La mayor parte de los restantes casos municipales de buen tamaño están a la par en su participación, tal y como lo indica el Cuadro 2.7.

El tabulado en cuestión permite reconocer a Sombrerete y Fresnillo como contribuyentes de las mayores áreas productoras, cada uno con 13 % del total estatal. Además, fueron suficientes los seis primeros municipios para acumular la mitad del total de la superficie cosechada estatal. Si se toman en cuenta los siguientes cinco casos se integrarán dos terceras partes. Con los 16 municipios de mayor extensión se completarán poco más del 75 % de los espacios cosechados. De igual manera es importante señalar que todos ellos se ubican en las zonas relativamente planas a las que se hizo alusión antes, confirmando de esa manera el supuesto que favorecía anticipar cuáles deberían ser las áreas con mayor nivel de superficie agrícola.

Cuadro 2.7 Estado de Zacatecas: superficie cosechada para principales cultivos del año agrícola 2014

Casos	Municipio	Superficie Sembrada (ha)	Superficie Cosechada (ha)	Superficie Cosechada (% del total)	Superficie Cosechada (% acumulado)
1	Sombrerete	146,737	144,352	13.06	13.06
2	Fresnillo	144,480	143,686	13.00	26.06
3	Pinos	100,710	88,909	8.04	34.10
4	Río Grande	75,687	75,687	6.85	40.95
5	Miguel Auza	57,463	57,463	5.20	46.14
6	Villa de Cos	85,230	55,395	5.01	51.15
7	Juan Aldama	39,977	39,977	3.62	54.77
8	General Francisco R. Murguía	39,160	39,160	3.54	58.31
9	Sain Alto	28,313	28,313	2.56	60.87
10	Guadalupe	32,466	27,860	2.52	63.39
11	Valparaíso	26,603	26,603	2.41	65.80
12	Ojocaliente	27,679	26,139	2.36	68.17
13	General Panfilo Natera	24,997	23,832	2.16	70.32
14	Loreto	22,160	21,960	1.99	72.31
15	Jerez	24,545	21,564	1.95	74.26
16	Pánuco	29,012	19,356	1.75	76.01
ESTADO DE ZACATECAS		1,220,340	1,105,457		

Fuente: Cálculos propios con datos del SIAP, 2016

Ante la continuidad que demuestra la ubicación de casos con mayor superficie cosechada, se percibe una concentración de ellos sobre la mitad central del estado, donde se encuentran siete de los ocho principales productores. El otro único municipio fuera de esa región es Pinos, situado en el extremo oriental. Tal vez el concepto de “corredor” o franja sea una mejor descripción de la concentración municipal antes referida, al transcurrir desde la porción media-oriental (en el límite de San Luis Potosí) hasta llegar al extremo centro-occidental (límites con Durango), como se aprecia en la Figura 2.17.

Es posible destacar los casos de Juan Aldama y Miguel Auza por su extensión territorial más bien mediana, a pesar de lo cual se encuentran en este grupo de casos protagónicos. Por el contrario, las zonas con menor tamaño se concentran sobre el extremo norte (tres casos) y extremo sur (16 casos), mientras diversos municipios de baja producción se encuentran relativamente dispersos, pero siempre hacia la porción sur del estado.

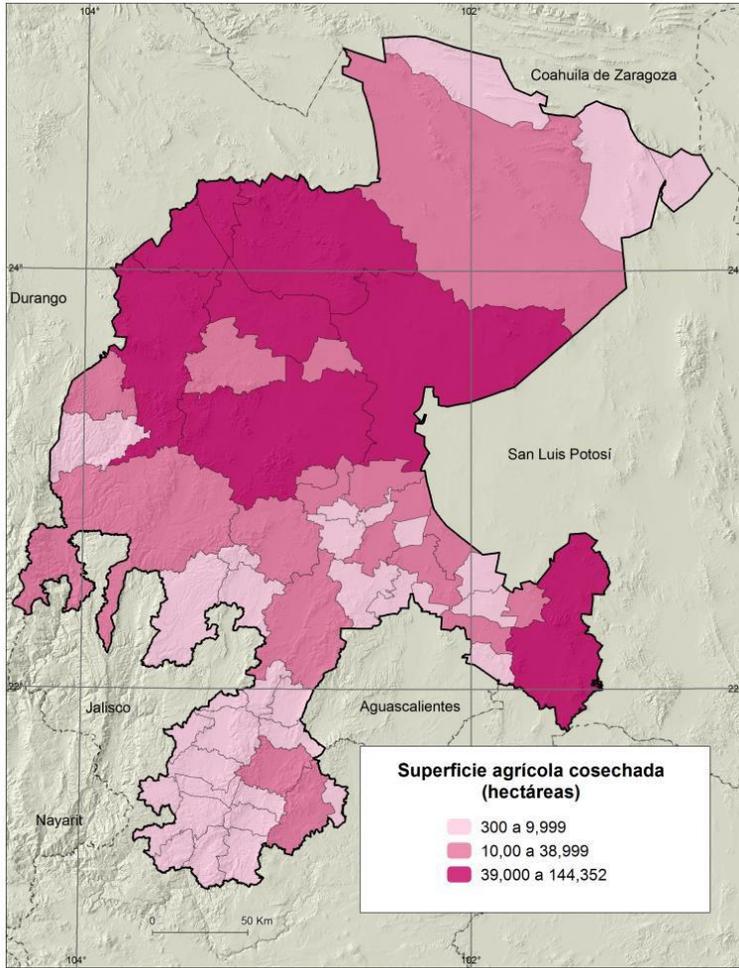


Figura 2.17 Superficie cosechada de cultivos cíclicos y perennes en tierras con riego y de temporal por municipio, 2014

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2016

La cartografía anterior puede ahora compararse con la Figura 2.18 que muestra la localización de las zonas de producción agrícola en la entidad, además de indicar la tipología respectiva por tipo de tierra de labor (con riego o de temporal). Al mismo tiempo, la representación espacial favorece apreciar el tamaño de la superficie que corresponde a los diversos tipos de superficie presentes en el estado de Zacatecas.

Es notable la ausencia de cultivos en la porción norte del estado, tal y como puede apreciarse tanto con la Figura 2.17 como la Figura 2.18. Del mismo modo son relativamente reducidas las zonas agrícolas situadas en el extremo sur. Otra vez se vuelve a perfilar la existencia de esa especie de “corredor” agrícola sobre la parte central de Zacatecas en sentido diagonal, desde el sureste hasta el noroeste. Tal vez lo más importante de este proceso comparativo es poder validar la coincidencia general de las cifras que aporta el SIAP y la trama espacial que ofrece INEGI.

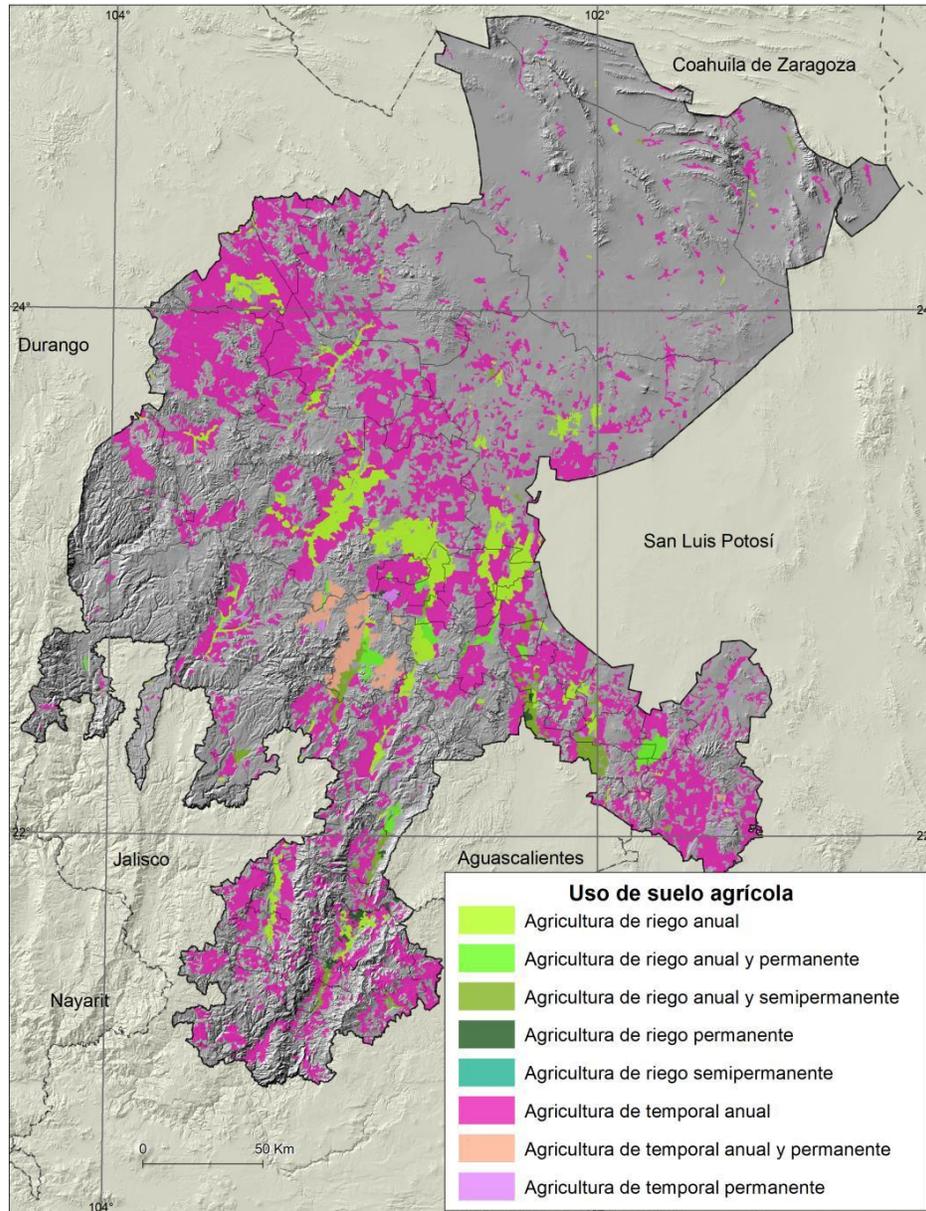


Figura 2.18 Uso agrícola en Zacatecas

Fuente: Elaboración propia con datos INEGI, Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación Escala 1: 250 000, serie V.

2.3.3 Superficie agrícola de riego y de temporal

Para analizar la participación del riego en la agricultura de Zacatecas es conveniente revisar el Cuadro 2.8, útil para ese fin.

Cuadro 2.8 Tipos de agricultura en Zacatecas

Tipo de agricultura	Porcentaje
Agricultura de riego anual	12.18
Agricultura de riego anual y permanente	1.96
Agricultura de riego anual y semipermanente	2.74
Agricultura de riego permanente	0.44
Agricultura de riego semipermanente	0.01
Agricultura de temporal anual	79.35
Agricultura de temporal anual y permanente	2.77
Agricultura de temporal permanente	0.54
Total estado de Zacatecas	100.00

Fuente: INEGI, Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación Escala 1: 250 000, serie V.

La distribución indicada demuestra que más del 82.66 % de la superficie agrícola depende del temporal, afirmación que se complementa con la Figura 2.19. En esta cartografía, además de categorizar los municipios de Zacatecas según la extensión de superficie total cosechada en 2014, se posibilita también dimensionar el “tamaño” de la agricultura en cada caso municipal.

De esa forma es posible afirmar que la mayor parte de los municipios del extremo sur del estado (con las posibles excepciones de Jalpa y Nochistlán) se caracterizan por una amplitud moderada; circunstancia similar a la del extremo noreste donde únicamente Mazapil alcanzó un nivel poco significativo en la cosecha de cultivos. Es viable afirmar que los municipios con mayor superficie agrícola en Zacatecas dependen de manera preponderante del temporal. Si se dejan de lado Fresnillo, Villa de Cos y Villanueva, los gráficos que aparecen en la cartografía referida demuestran que la cobertura de riego es marginal en prácticamente todos los demás.

Por lo tanto, no es casual que los dos primeros casos mencionados antes cuenten con las áreas de riego más extensas encabezados por Fresnillo, el cual concentró 26 % del total de tierras con riego, Figura 2.20; seguido por Villa de Cos (7.6 %), Guadalupe (6.4 %), Loreto (5.2 %) y Calera (4.3 %). De hecho, la mitad de la superficie estatal de regadío (74 mil hectáreas) se encuentra en esos cinco municipios, Cuadro 2.9.

La situación es diferente al revisar los valores relativos del Cuadro 2.10 donde se muestra cuáles son los casos municipales con abundante regadío con relación al tamaño de su área agrícola.

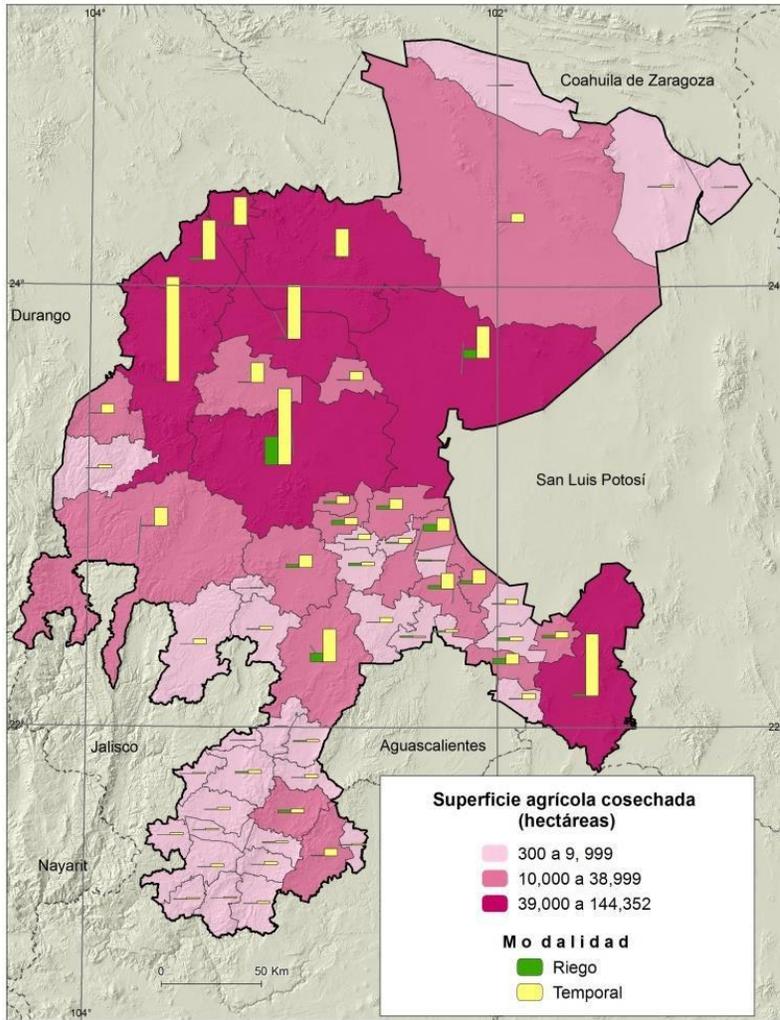


Figura 2.19 Superficie cosechada y modalidad de tierra de labor en Zacatecas, 2014

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2016



Figura 2.20 Infraestructura de riego agrícola en Fresnillo

Fuente: E. Segundo, marzo de 2017

Cuadro 2.9 Principales municipios por Superficie
Cosechada con riego en Zacatecas, 2014

Caso	Municipio	Superficie cosechada Total (ha)	Superficie cosechada con riego (ha)	Superficie cosechada con riego (% del total estatal)	Superficie cosechada con riego (% acumulado)
1	Fresnillo	143,685.8	38,870.8	26.0	26.0
2	Villa de Cos	55,395.0	11,365.0	7.6	33.6
3	Guadalupe	27,860.3	9,614.8	6.4	40.0
4	Loreto	21,960.0	7,838.0	5.2	45.3
5	Calera	16,226.7	6,375.0	4.3	49.5
6	Pánuco	19,356.0	4,882.0	3.3	52.8
7	Ojocaliente	26,139.3	4,488.3	3.0	55.8
8	Jerez	21,564.0	4,331.0	2.9	58.7
9	General Panfilo Natera	23,831.5	4,290.5	2.9	61.6
10	Jalpa	10,125.3	4,035.8	2.7	64.3
11	Villanueva	20,153.1	3,760.1	2.5	66.8
12	Noria de Ángeles	8,511.7	3,744.5	2.5	69.3
Total Estatal		1,105,457.0	149,484.6	13.5	69.3

Cuadro 2.10 Principales municipios por porcentaje de
Superficie Cosechada con riego en Zacatecas, 2014

Fuente: SIAP, 2016

Caso	Municipio	Superficie cosechada Total (ha)	Superficie cosechada con riego (ha)	Superficie cosechada con riego (% del total municipal)
1	Cuauhtémoc	3,520.0	2,084.0	59.2
2	Trancoso	4,602.0	2,524.0	54.8
3	Noria de Ángeles	8,511.7	3,744.5	44.0
4	Momax	888.0	377.0	42.5
5	Apozol	3,993.1	1,674.6	41.9
6	Zacatecas	7,902.7	3,207.7	40.6
7	Jalpa	10,125.3	4,035.8	39.9
8	Calera	16,226.7	6,375.0	39.3
9	Tabasco	4,942.0	1,792.0	36.3
10	Loreto	21,960.0	7,838.0	35.7
11	Guadalupe	27,860.3	9,614.8	34.5
12	Tlaltenango	6,083.0	1,997.0	32.8
Total Estatal		1,105,457.0	149,484.6	13.5

Fuente: SIAP, 2016

De los 12 municipios listados en cada uno de los cuadros únicamente cinco repiten en ambos (Guadalupe, Loreto, Calera, Jalpa y Noria de Ángeles). Son notables los casos de Cuauhtémoc y Trancoso, donde más de la mitad de su área agrícola se beneficia de la disponibilidad de riego artificial. En conjunto las unidades municipales registradas en el Cuadro 2.10 se localizan en el extremo suroriental y sur del estado.

2.3.4 Ciclos agrícolas: otoño-invierno y primavera-verano

Al igual que en el resto del país, en Zacatecas se levantan cosechas en cada uno de los dos ciclos tradicionales. Sin embargo, las condiciones físicas de esa entidad provocan características muy particulares. Por ejemplo, revisando el Cuadro 2.11 se observa que los cultivos correspondientes al ciclo primavera-verano aportan cerca del 93 % de la superficie estatal cosechada, mientras que los dos tipos de cultivos restantes participan de manera relativamente marginal en la agricultura local.

Cuadro 2.11 Participación por tipo de cultivo en superficie cosechada de Zacatecas, 2014

Características	Total	Perennes	Otoño-invierno	Primavera-verano
Superficie en hectáreas	1105456.97	65329.35	15709	1,024,418.62
Parcial en el total estatal	100.00%	5.90%	1.40%	92.70%

Fuente: SIAP, 2016

Esta circunstancia es trascendente para la investigación, ya que el objetivo central contempla el analizar los datos del ciclo primaveral enfocados hacia tierras de temporal. Mediante el tabulado anterior se demuestra que al hacerlo de esa manera únicamente se perderá una parte poco sustancial de la información general concerniente a las cosechas.

Para el 2014 se contabilizaron 28 casos, en los cuales la superficie cosechada en el ciclo primavera-verano representó más del 90 % del total municipal. El Cuadro 2.12 permite identificar los más notables. En total 50 unidades municipales reportaron más de $\frac{3}{4}$ partes de su producción en este ciclo. Por el contrario, los municipios con menores registros en este ciclo fueron Trinidad García de la Cadena (62 %), Jalpa (54 %), Apozol (51 %) y Moyahua de Estrada (50 %), mientras que Momax presentó el mayor porcentaje de cosechas en el ciclo otoño-invierno (16 % de su total), a la vez que cuatro municipios destacaron por la amplia superficie reservada para perennes, encabezados por Moyahua (47 %), seguido por

Apozol (39 %), Trinidad García de la Cadena (38 %) y Jalpa (35 %); todos ellos localizados en el extremo sur del estado, donde el clima es propicio para el cultivo de frutales y otros perennes.

La representación espacial de la participación del ciclo primavera-verano en la producción municipal total (Figura 2.17) sería redundante con respecto a la distribución de la superficie cosechada total, debido a la información del Cuadro 2.11, al respecto de que más del 90 % del total agrícola se cosecha en el ciclo referido. De elaborar cartografía para este ciclo sólo repetiría las mismas tendencias. Por esa razón, se optó por generar la Figura 2.21 en términos del porcentaje aportado por los cultivos de primavera y verano en relación con la superficie cosechada total de cada municipio.

Cuadro 2.12 Municipios de Zacatecas con mayor participación en el ciclo primavera-verano, 2014

Municipio	Perennes	Otoño-Invierno	Primavera-Verano
	Año Agrícola Sup. Cosechada (ha)	Año Agrícola Sup. Cosechada (ha)	Año Agrícola Sup. Cosechada (ha)
El Salvador	0.31	0.00	99.69
El Plateado de Joaquín Amaro	0.80	0.00	92.20
Río Grande	0.76	0.26	98.97
Saint Alto	0.36	0.85	98.79
Chalchihuites	0.94	0.40	98.66
General Panfilo Natera	1.16	0.21	98.63
Cañitas de Felipe Pescador	0.17	1.20	98.63
Sombrerete	1.38	0.04	98.58
Juan Aldama	1.34	0.56	98.10

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2016

De esta forma, se identificaron regiones específicas en función de la superficie cosechada dentro del ciclo primavera-verano. Como se observa, la mayoría de los municipios donde ese ciclo es predominante abarcaron gran parte del territorio estatal. Las excepciones más notables se ubicaron en dos regiones de menor tamaño. La primera de ellas se localizó hacia el extremo sureste de la entidad con valores entre 70 y 89.99 % del total de superficie cosechada. En cuanto a la segunda región, ésta abarcó el extremo sur del estado, donde ocho municipios compartieron una participación alta de este ciclo, junto con otros diez

casos con valores porcentuales menores (entre 50.35 y 69.99 %). Finalmente, tres municipios se destacaron por sus condiciones también de excepción: Jerez y Calera, sobre la zona central, y Concepción del Oro al noreste, todos ellos con porcentajes promedio dentro de la región con los valores más elevados.

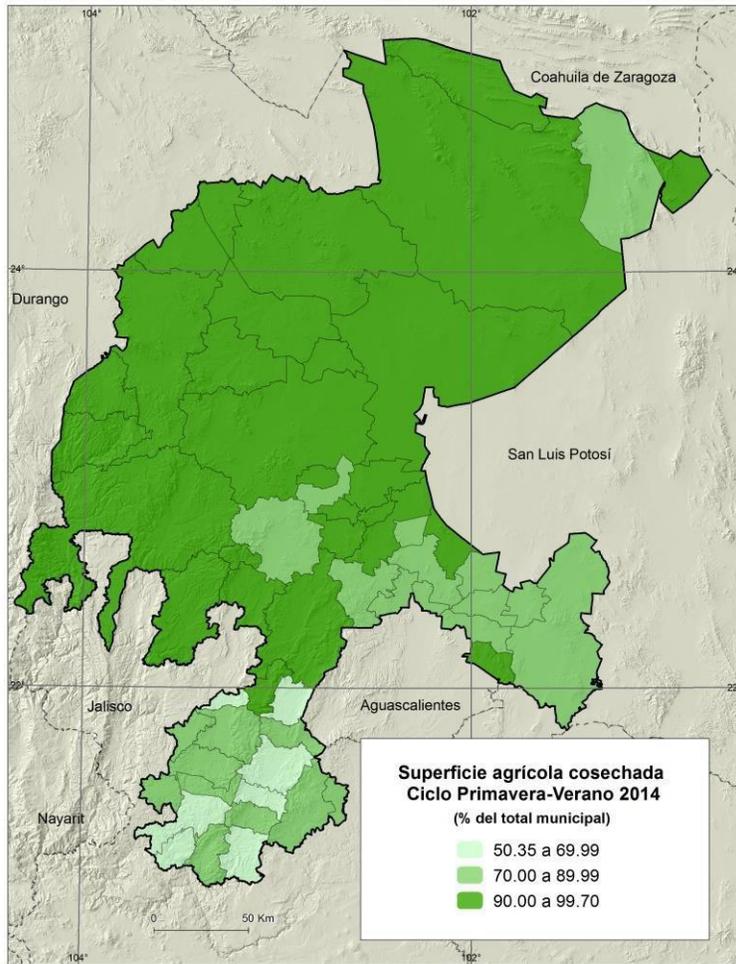


Figura 2.21 Estado de Zacatecas: Participación municipal en el ciclo primavera-verano por superficie cosechada, 2014

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2016

2.3.5 Superficie agrícola siniestrada

La última parte del capítulo tiene como función explicar y analizar en principio la pérdida de cosechas sufridas en los municipios del Estado de Zacatecas. Como se puede observar, este apartado es el que demuestra mayor relación con uno de los objetivos particulares del trabajo de tesis. Si bien, por ahora se limita a una mención general de la siniestralidad

para el conjunto de cultivos y ciclos agrícolas en un año promedio, como fue 2014; en el tercer capítulo se entrará a detalle sobre esta misma temática.

En el apartado 2.3.2 se presentaron diversos datos estadísticos para cuantificar la superficie dedicada al cultivo, especificando un área que abarcó 1.20 millones de hectáreas (SIAP, 2016). De ese total se cosecharon 1.09 millones de hectáreas, resultando una diferencia de 112 mil hectáreas, el 9.3 % del total sembrado, diferencia equivalente a la superficie siniestrada para ese año. De entrada, el valor porcentual referido parece ser relativamente moderado; de hecho, lo es, a pesar de que duplicó el promedio nacional (4.7 %).

Con base en la información oficial, Villa de Cos acumuló el 27 % del total de la superficie perdida (poco más de 29 mil hectáreas) seguido por Pinos (11 mil hectáreas). En términos de la extensión que alcanzó, la siniestralidad se concentró en 11 municipios, los cuales representaron $\frac{3}{4}$ partes del total estatal. Por otra parte, en términos relativos fueron tres los casos más afectados: El Salvador, donde se perdió 51 % del total sembrado, seguido por Cuauhtémoc (50 %) y Melchor Ocampo (46 %). Aparte de los tres anteriores, en este mismo contexto, otros siete casos reportaron volúmenes de pérdida que fueron desde una tercera parte de la cosecha hasta la mitad de esta.

Lo antes mencionado da elementos para afirmar que el promedio de siniestralidad estatal, de 9.3 %, podría ser poco representativo en términos del daño sufrido en los casos municipales con mayor grado de afectación. Además, conviene recordar que se está considerando como referencia un año (2014) que puede considerarse promedio, es decir, sin evidencia de algún evento más o menos notable en cuanto a la ocurrencia de una sequía intensa.

La Figura 2.22 presenta el impacto de la siniestralidad en las diversas regiones de Zacatecas. Es notable que las mayores pérdidas se registraron en el norte y noreste de la entidad, afectando a pocos municipios aun cuando estos son de los que cuentan mayor extensión territorial (Melchor Ocampo, Concepción del Oro, El Salvador, Mazapil y Valle de Cos). Del mismo modo, el daño más notable se orientó hacia la franja sureste del estado en donde afectó a otros seis casos municipales.

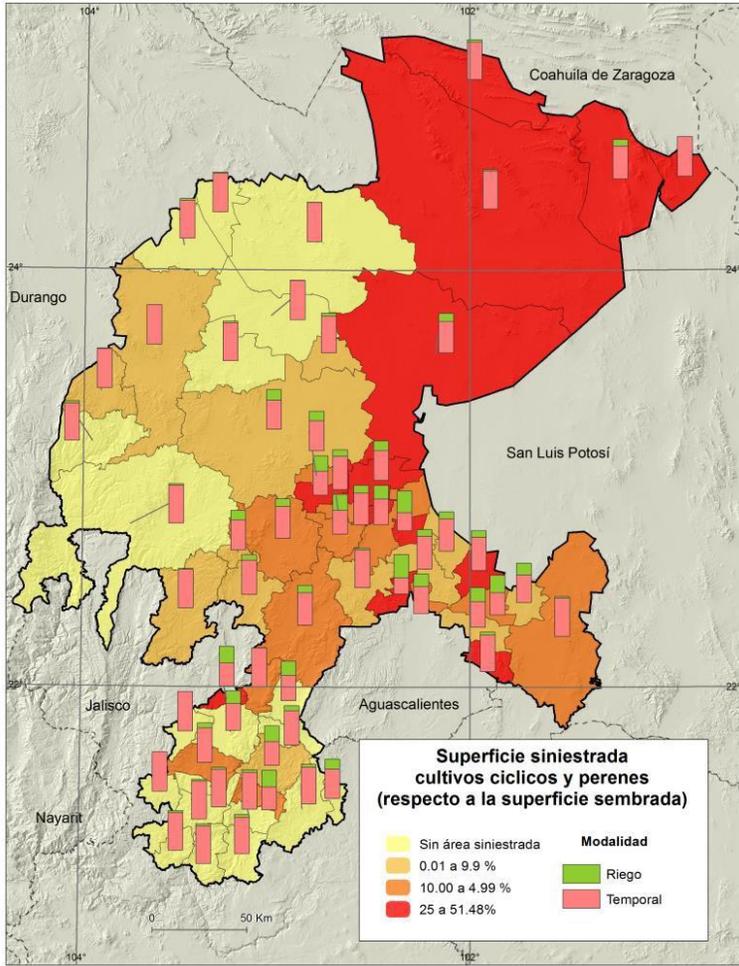


Figura 2.22 Estado de Zacatecas: Superficie siniestrada municipal y disponibilidad de riego, 2014

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2016

En contraste con los anteriores, la mitad occidental del estado, así como su extremo sur tuvieron una problemática relativamente moderada, ya que en pocos casos perdieron más allá del 10 % de la superficie sembrada total.

Capítulo III

Distribución de Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) en Zacatecas y su relación con el porcentaje de superficie agrícola de temporal siniestrada

El interés de este trabajo se centra en conocer la relación espacial entre las diferentes intensidades de sequía que afectaron al estado de Zacatecas durante el ciclo agrícola primavera-verano de 2011 y el porcentaje de superficie siniestrada en cultivos de temporal para este mismo periodo. Para lograr este objetivo, dentro del presente apartado se detalla la metodología propuesta en el primer capítulo. Los resultados obtenidos a partir de estos pasos son los fundamentos para corroborar o rechazar la hipótesis que sustenta esta tesis.

La metodología es parte del análisis espacial, el cual "[...] se centra en el estudio, de manera separada, de los componentes del espacio, definiendo sus elementos constitutivos y la manera como estos se comportan bajo ciertas condiciones. Para esto, se vale de un conjunto de herramientas técnicas que, de acuerdo con lo anterior, sólo pueden dar respuesta a una parte de la dinámica del espacio, mas no a su totalidad" (Madrid y Ortiz, 2005: 19).

3.1 Desarrollo metodológico

La hipótesis del trabajo asume que la relación espacial de intensidad de sequía en 2011 no fue proporcional respecto al porcentaje de superficie siniestrada en la agricultura de temporal, del ciclo primavera-verano, dentro del estado de Zacatecas. Bajo este contexto, la metodología base que se consideró para corroborar este supuesto fue la utilizada por Moreno (2013), cuyo empleo se dirigió a determinar el grado de exposición a la polución atmosférica de diferentes grupos sociodemográficos. En esta investigación el procedimiento referido se modificó para hacerlo compatible con el ámbito climático mediante el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y el Porcentaje de Superficie Siniestrada (PSS).

Lo anterior con el propósito de ubicar las áreas que reportaron mayor magnitud de sequía pero con porcentaje de superficie agrícola siniestrada inferior a la promedio. En este sentido, las etapas fueron las siguientes:

- 1) Calcular el valor del SPI y ubicar su distribución espacial dentro del estado de Zacatecas durante el ciclo agrícola primavera-verano de 2011.
- 2) Identificar el área agrícola de temporal y la superficie siniestrada en el ciclo mencionado.
- 3) Relacionar SPI y superficie siniestrada en ese ciclo de 2011.

Para concretar los puntos anteriores fueron necesarios varios procedimientos en cada uno de ellos, los cuales se precisan en los siguientes apartados.

3.2 Distribución espacial del SPI en Zacatecas, en ciclo primavera verano, 2011

Para determinar la distribución espacial de la sequía en el estado de Zacatecas se hizo uso del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), el cual refleja las condiciones de escasez o excesos de precipitación referidos a un periodo extenso (mínimo 30 años). Después de obtener ese indicador fue preciso representarlo sobre el área de estudio y, de esa forma, conocer sus diferentes intensidades.

En relación con lo anterior, los apartados subsiguientes especifican los procesos que se llevaron a cabo para conocer la distribución espacial del fenómeno.

3.2.1 Bases de datos

Los datos son inherentes al análisis espacial: "Permiten identificar y caracterizar los componentes del espacio y puede aceptarse que un tratamiento adecuado de los mismos permite construir esquemas de funcionamiento del espacio, hacer visibles algunas de sus relaciones y posibilita dimensionar sus regularidades e irregularidades" (Madrid y Ortiz, *op. cit.*: 27).

La información climática disponible actualmente proviene básicamente de dos fuentes: la primera está representada por la red superficial de estaciones climáticas, mientras que la otra corresponde a sensores remotos. Al respecto, Fernández (1996) explica que las estaciones se caracterizan por contar con un carácter local, es decir, relacionado con la localización de un observatorio; además proveen series temporales largas que permiten un análisis estadístico más o menos complejo, suficientes para definir rasgos del clima; recientemente se han visto mejoras en ellas a partir de su automatización así como del uso de radares. Por su parte, las segundas cuentan con un alcance global al cubrir toda la superficie terrestre, aunque el tamaño del pixel es variable dependiendo el sensor; sus series disponibles por lo general son cortas; sus instrumentos tecnológicamente son muy avanzados, cuya base física es la teledetección.

No se puede decir que una sea mejor que otra, más bien son complementarias. Por ejemplo, la mayor cobertura geográfica de la información proporcionada por los sensores remotos ayuda a subsanar la carencia de estaciones locales; mientras que los observatorios con series de años más extensas permiten perfeccionar los resultados y modelos basados en teledetección.

En lo que respecta a esta investigación se consideró la Base de Datos Climatológica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), red terrestre que, al 31 de diciembre de 2014, contaba con 3153 estaciones (CONAGUA, 2015). Éstas registran datos de temperatura, precipitación, evaporación y fenómenos naturales visibles al ojo humano, como tempestades eléctricas, granizo, niebla y estado del cielo en general. Además, contienen información del sitio donde fue registrada la información climática, como lo es el nombre de la localidad, el municipio y sus coordenadas geográficas (SMN, 2016). Con ese referente, la información estadística se obtuvo a partir de los datos diarios de precipitación correspondientes a las 160 estaciones con las que cuenta el estado de Zacatecas.

3.2.1.1 Selección de estaciones y periodo de sequía

Si bien las estaciones incluidas por el SMN sumaron 160, fue preciso considerar únicamente las que contaran con registros por lo menos de 1980 a 2012 (32 años), ya que como menciona la Organización Meteorológica Mundial OMM (2011), en lo que respecta a la precipitación, se requieren un mínimo de 30 años de observaciones para elaborar los parámetros estadísticos pertinentes.

Además, un punto imprescindible a evaluar es la cantidad de registros faltantes en la serie de datos por el hecho de ser común encontrar vacíos que abarcan años completos. Ante esta nueva limitación se seleccionaron las estaciones con más del 80 % de los datos totales de precipitación.

Después de realizar la depuración de las bases de datos del total de las estaciones quedaron 48. Cada una de ellas se representó espacialmente, como se puede observar en la figura 3.1. La clave que se muestra se estructura con cinco dígitos; los dos primeros hacen referencia al número del estado (32); mientras que los tres restantes son propios de cada estación. Así, la mayor concentración se ubica en el este y al sur en zonas propias de valles y llanura, seguramente sobre las áreas con mayor vocación agrícola. Por la misma razón, el norte cuenta con el menor número de estas instalaciones.

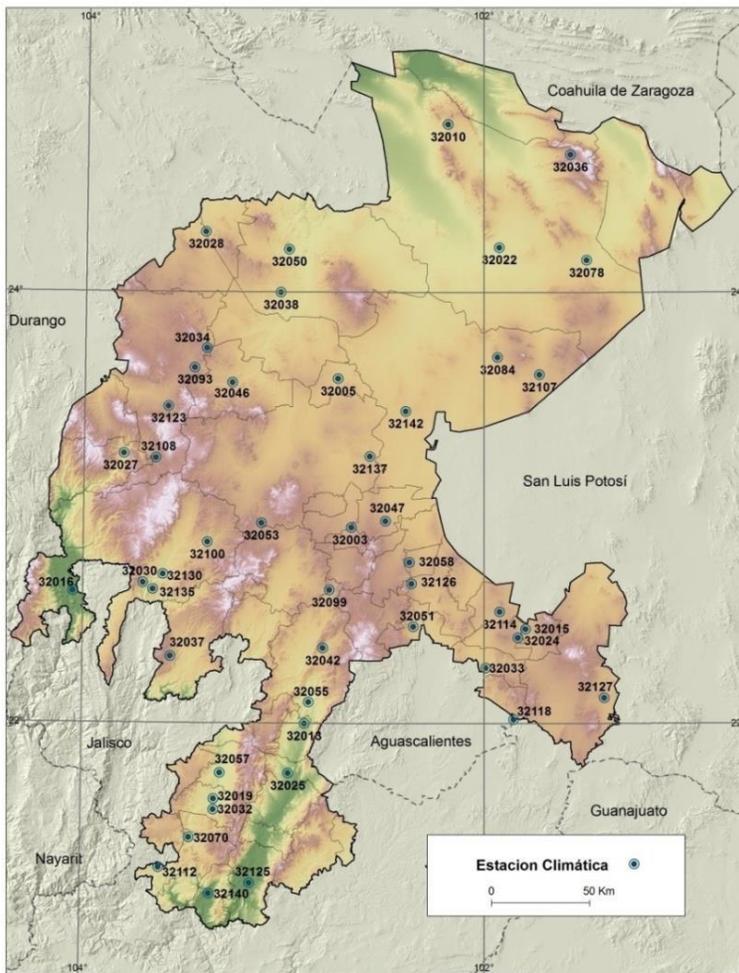


Figura 3.1 Distribución de 48 estaciones climáticas seleccionadas

Fuente: Elaboración propia con base en SMN, 2016

3.2.1.2 Homologación de los datos

Una vez seleccionada esta información se sometieron a un tratamiento de homogenización. Para ello, se construyó una gráfica por cada uno de los días de cada mes por los treinta y dos años de estudio. Un ejemplo de ello se puede observar en la figura 3.1, donde se indica cómo los valores que estaban fuera de rango se sustituyeron con la media aritmética de la serie. En un segundo paso fue necesario concentrarlos en una matriz mensual, formato requerido al momento de calcular el SPI (Cuadro 3.1).

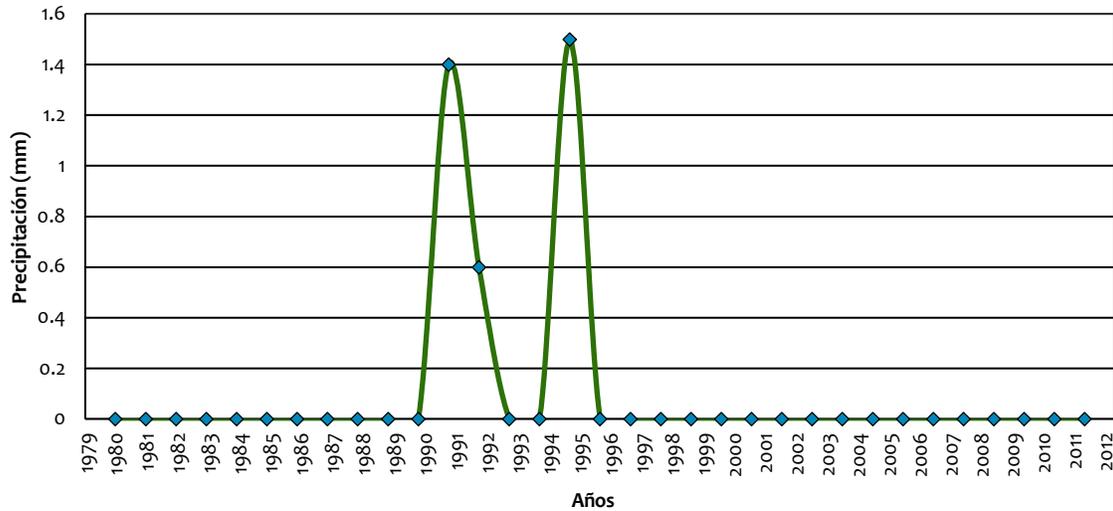


Figura 3.2 Estación 32003: Comportamiento de la precipitación pluvial el día 1 de enero, 1980-2012

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2016

Cuadro 3.1 Distribución de estaciones climáticas seleccionadas

EST: 32003

MES	Ene	Feb	Mar	Abril	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
1980	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
1981...	P2											
2012	P3											

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.3 Tratamiento de datos faltantes

Como se ha indicado, los registros por mes de las 48 estaciones fueron homologados en una base de datos común. No obstante, para obtener el indicador es indispensable que las matrices estén completas. En este punto es necesario recordar que algunas presentan hasta 20 % de datos faltantes; por lo tanto, fue necesario someterlas a un tratamiento de rellenado.

Al respecto, Fernández (2006) expresa que los métodos más usuales para este fin son dos: el de las diferencias y la correlación. El primer caso consiste en estimar la media de una serie incompleta a partir de la comparación de la serie parcial existente durante los mismos periodos en la estación completa. El segundo implica la interpolación de los valores inexistentes por el ajuste de una recta de regresión elaborada mediante la información entre dos estaciones, una completa y una incompleta. Esta última representa la variable dependiente, y la segunda (estación completa) aporta la variable independiente, lógicamente de la cual depende la anterior. Como se sabe, entre las dos estaciones a comparar debe existir una correlación significativa, ya que de otra forma el cálculo será impreciso. Por ende, el comportamiento de las variables deberá ser razonablemente similar.

La regresión lineal se expresa:

$$y' = a + bx$$

Donde:

y': es la variable cuyo valor se desconoce

a: es la variable conocida

bx: la pendiente de la curva de regresión

Para que el ajuste sea correcto, Fernández (*op. cit.*) señala tres recomendaciones: la primera, la existencia de un mínimo entre 5 y 15 años entre las series; la segunda, una proximidad geográfica entre los observatorios de 7' (7 minutos de arco), además de contar con una correlación (r) mayor a +0.70, estos criterios pueden variar dependiendo del área de estudio; y, finalmente, comprobar que la nueva serie resultante de la correlación aporte un incremento a la información original, esto se logra cuando el coeficiente de determinación de la regresión (r^2) es superior o igual a $1/(n_1-2)$. Siendo n la longitud de la serie incompleta.

Bajo las premisas anteriores se procedió a rellenar los datos con la información de las estaciones más cercanas utilizando regresiones lineales. Este procedimiento debía de contar con un $r > 0.70$, además se consideró que debían de corresponder a estaciones con climas similares (Figura 3.3). En el caso de que estos principios no logran cumplirse se empleó la media histórica de la estación del valor del mes en cuestión donde, como expresa Barrera (2004), es recomendable que los coeficientes de variación sean lo más pequeños posible (inferiores al 5%) o con desviaciones típicas mucho menores que su valor medio (es decir, con bajo coeficiente de variación).

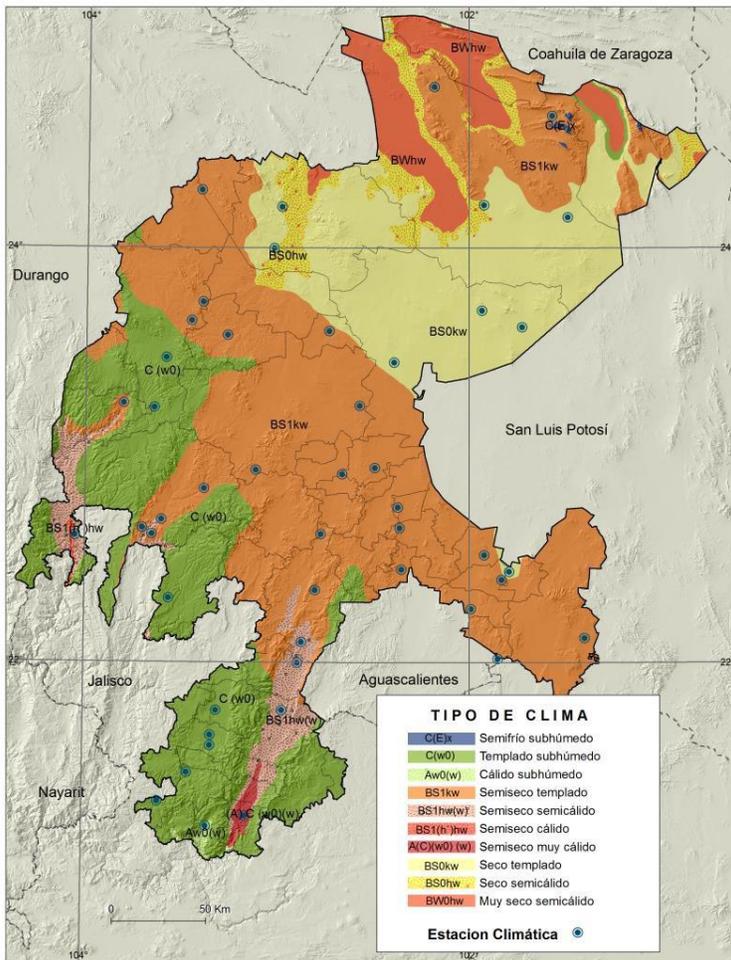


Figura 3.3 Distribución del clima y estaciones climáticas seleccionadas

Fuente: INEGI y SMN, 2016

3.2.3 Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

Luego de contar con los registros mensuales de precipitación de 1980 a 2012, de las 48 estaciones, se elaboró otra matriz, ahora con tres columnas (Cuadro 3.2), formato establecido para los datos de entrada al utilizar el programa SPI_SL_6.exe¹, con el cual se obtuvo el valor del SPI. De las diferentes escalas temporales disponible para el indicador se empleó la de nueve meses, pues cubre todo el ciclo agrícola primavera-verano (en este caso cubre de marzo a noviembre). Así el índice a finales de noviembre compara el total de

¹Guía del usuario y programa disponible en la siguiente dirección electrónica [http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx]

precipitación para el periodo de marzo a noviembre con todos los totales precedentes para el mismo periodo.

Cuadro 3.2 Formato para obtener valores de SPI

Año	Mes	Precipitación
1980	1	P1
1980	2	P2
1980	3	P3
1980	4	P4
1980	5...	P5
1980	12	P6
1981	1	P1

Fuente: Elaboración propia

EST_SPI9												
FID	Shape *	Name	Nom_Est	Lat	Long	alt	TmaxP	TminP	PreciP	Name_1	ASPI1_9	
19	Point ZM	32042	PALOMAS	22.3	-102.8	2025	25.21	7.63	531	32042	-1.79	
20	Point ZM	32046	SAIN ALTO	23.5	-103.26	2071	26.49	7.18	461.4	32046	-3.26	
21	Point ZM	32047	SAN ANTONIO DEL CIPRES	22.9	-102.49	2173	24.62	8.92	417.1	32047	-0.17	
22	Point ZM	32050	SAN GIL	24.2	-102.98	1829	27.88	9.43	341.9	32050	-1.51	
23	Point ZM	32051	SAN PEDRO PIEDRA GORDA	22.4	-102.35	2053	25.18	8.15	414	32051	-1.23	
24	Point ZM	32053	SANTA ROSA	22.9	-103.11	2236	23.71	6.63	471.1	32053	-1.71	
25	Point ZM	32055	TAYAHUA	22.1	-102.87	1729	28.82	9.96	547.7	32055	-2.22	
26	Point ZM	32057	TLALTENANGO SANCHEZ ROM	21.7	-103.31	1685	27.73	8.56	740.9	32057	-2.06	
27	Point ZM	32058	TRANCOSO	22.7	-102.37	2200	22.93	8.41	437.5	32058	-0.02	
28	Point ZM	32070	TEUL DE GONZALEZ ORTEGA	21.4	-103.46	1909	26.48	9.31	810.6	32070	-2.49	
29	Point ZM	32078	SAN TIBURCIO (DGE)	24.1	-101.48	1885	27.3	6.6	336.6	32078	-0.94	
30	Point ZM	32084	SAN ANDRES	23.7	-101.93	2087	24.11	6.91	384.7	32084	-1.68	
31	Point ZM	32093	EL ARENAL	23.6	-103.45	2219	23.72	6.66	479.5	32093	-1.91	
32	Point ZM	32099	MALPASO	22.6	-102.77	2119	25.11	8.07	408.8	32099	-0.35	
33	Point ZM	32100	SAN ISIDRO DE LOS GONZA	22.8	-103.38	2037	22.55	5.63	507.7	32100	-1.5	
34	Point ZM	32107	SIERRA HERMOSA	23.6	-101.72	2092	23.32	5.87	363	32107	-1.94	
35	Point ZM	32108	CORRALES	23.2	-103.64	2256	24.67	6.03	483.9	32108	-1.32	
36	Point ZM	32112	MILPILLAS DE ALLENDE	21.3	-103.61	1919	24.48	8.28	837.2	32112	-2.47	
37	Point ZM	32114	VILLA GONZALEZ ORTEGA	22.5	-101.92	2154	25.61	7.56	357	32114	-1.56	
38	Point ZM	32118	LOS CAMPOS	22.0	-101.85	2103	25.05	7.07	452.9	32118	-3.19	
39	Point ZM	32123	MESILLAS	23.4	-103.58	2181	24.46	6.68	474.3	32123	-1.9	
40	Point ZM	32125	MOYAHUA DE ESTRADA	21.2	-103.16	1180	31.02	10.2	721.6	32125	-2.17	
41	Point ZM	32126	PALMILLAS	22.6	-102.36	2169	23.88	8.31	415.6	32126	-0.53	
42	Point ZM	32127	PINO SUAREZ	22.1	-101.4	2119	24.48	7.31	415.6	32127	-1.79	
43	Point ZM	32130	EL ROMERILLO	22.6	-103.65	2085	25.38	9.38	612.7	32130	-2.09	
44	Point ZM	32135	POTRERO DE GALLEGOS	22.6	-103.7	2017	25	5.95	661.3	32135	-2.36	
45	Point ZM	32137	CHICHMEQUILLAS	23.2	-102.57	2072	25.98	7.21	375.9	32137	-1.28	
46	Point ZM	32140	MEZQUITAL DEL ORO	21.2	-103.36	1208	31.57	12.51	804.3	32140	-0.4	

Figura 3.4 Unión de valores SPI con estaciones climáticas seleccionadas

Fuente: Elaboración propia

Los datos de salida son proporcionados en un archivo *.dat*, el cual se abrió y ajustó mediante el programa EXCEL para posteriormente elegir solamente los valores de SPI, del mes de octubre de 2011, de cada una de las 48 estaciones. Con ello se cubrió la totalidad del ciclo agrícola elegido.

El paso siguiente fue asignar los valores del SPI₉ a cada una de las estaciones climáticas, el cual se concretó mediante la herramienta *join* con la que cuenta el SIG, donde el campo en común fue el nombre de las estaciones climáticas, Figura 3.4.

3.2.4 Interpolación del SPI

Para conocer la distribución espacial de los diferentes rangos de sequía fue preciso realizar una interpolación. Esta operación puede definirse como la estimación de valores desconocidos a partir de un conjunto de puntos de muestra con valores determinados. En el contexto espacial es común su aplicación cuando se busca generar una superficie continua a partir de valores puntuales relativamente dispersos que no logran cubrir la totalidad de un territorio específico.

El supuesto principal de la interpolación en términos espaciales se fundamenta en la primera ley de la geografía o principio de auto correlación establecido por Tobler (1970), donde señala que "Todas las cosas están relacionadas entre sí, pero las cosas más próximas en el espacio tienen una relación mayor que las distantes".

Si bien es posible crear una amplia superficie a partir de una pequeña muestra, la realidad es que mientras mayor sea el número de puntos se podrá tener una mejor representación del área de estudio, en especial al pretender generar una superficie donde todos los puntos que la forman estarán asociados a un valor concreto.

En este sentido, Santos y García (2008) indican que los métodos de interpolación se pueden clasificar en dos grupos; uno de ellos lo forman las técnicas llamadas determinísticas, mientras que el otro incluye las geográficas estadísticas. En el primer caso utilizan funciones matemáticas que sirven para ajustar de forma precisa la nube de puntos muestrales de partida, a partir de un conjunto de variables explicativas, capaces de evidenciar las variaciones espaciales de forma conjunta. Mientras que en el segundo caso emplean métodos basados en los valores de partida, tratando de calcular el valor de los puntos de la superficie a determinar, por medio de procedimientos fundamentados en la estructura espacial de la información.

También es posible clasificarlas en globales y locales; las globales se caracterizan porque en su estimación se usan todos los datos de la muestra para calcular el valor en cada punto, dejando de lado si se encuentran cerca o lejos. Por su parte, las locales sólo consideran los puntos de muestreo más cercanos. En este sentido, los métodos globales son útiles para reconocer y eliminar sesgos, para después afinar los valores obtenidos mediante una serie de interpolaciones locales.

Finalmente, se cuenta con una última categorización, la cual divide las técnicas en exactas e inexactas. Esto es, cuando se predice un valor ya conocido y éste coincide con el calculado se denomina interpolador exacto. En cambio, en el tipo inexacto la predicción es diferente del valor medido. Lo anterior responde al objetivo de dar una salida “suavizada”, mediante la cual se intentan evitar los picos o depresiones pronunciadas en la superficie de salida. Las modalidades de técnicas de interpolación espacial se resumen en el Cuadro 3.3.

Después de conocer las principales características de los métodos de interpolación y considerar estudios previos como los de Rojas (*et al.*, 2010), Revelo (*et al.*, 2014) y Cañada (*et al.*, 2014), se optó por utilizar el método del Inverso de Distancia Ponderada (IDW, por sus siglas en inglés) complementada con la técnica de *kriging*.

Cuadro 3.3 Clasificación de métodos de interpolación espacial

Método	Global/local	Tipo de interpolación
Polígonos de Thiessen	Local	Exacta
Triángulo de Delaunay	Local	Exacta
Inverso de la Distancia y Medias Móviles	Local	Inexacta cuando se aplica una técnica de “suavizado” de la superficie a interpolar
Superficies de tendencia	Global	Exacta
Splines	Local	Exacta, con un refinamiento limitado
Kriging	Local, pero con un variograma global	Exacta

Fuente: Lam (1983), Burrough y MacDonell (1998), citados en Santos y García (2008: 354).

En el primer caso, el IDW es una técnica de interpolación local en la que los valores en ubicaciones sin muestreo están en función de valores en ubicaciones muestreadas dentro de una zona de influencia especificada (radio). La ponderación (o influencia) de las ubicaciones circundantes está dada por la distancia inversa, es decir, cuanto más cerca esté un punto de muestra del valor a estimar, este último se asemejará más al valor muestreado. De esta

manera se cumple el principio de que las cosas más cercanas son más parecidas que aquellas más lejanas. La fórmula general para su cálculo es:

$$\hat{z}_j = \sum_{i=1}^n k_{ij} \times z_i$$

Donde:

\hat{z}_j = es el valor estimado para j

n = número de puntos usados en la interpolación

k_{ij} = peso asociado al dato i en el cálculo del nodo j

z_i = el valor en el punto i-ésimo

El procedimiento de cálculo de los pesos asignados es:

$$z_j = \frac{\sum_i z_i / d_{ij}^\beta}{\sum_i 1 / d_{ij}^\beta}$$

En este caso β es un exponente de ponderación, es decir, regula la forma en la que el peso disminuye en relación con la distancia, el valor predeterminado es dos; sin embargo, es posible utilizar potencias superiores; entre mayor sea el valor se reforzará la influencia de los puntos muestrales más cercanos.

El segundo, el método *kriging* o *krigeado* originalmente se utilizó en el campo de la minería por el ingeniero Daniel Krige y el geo-matemático francés Georges Matheron. En su inicio este procedimiento fue una herramienta para interpolar datos dispersos "[...] con el objeto de ser aplicado en la industria minera, en concreto en la estimación de mineral recobable, cosa que es muy importante ya que la variabilidad local puede afectar la ganancia al explotar una mina" (Giménez *et al.*, 2014: 74).

Así la ecuación que sigue el método es²:

$$\hat{z}_j = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times z_i$$

Donde λ_i representa los pesos o ponderaciones de los valores originales (Z_i). Estos se calculan en función de la distancia entre los puntos existentes y el punto donde se va a hacer la predicción pertinente. En este sentido, a diferencia del IDW, los pesos se asignan en función a la estructura espacial de los datos. La manera en la que es posible explorar y cuantificar la dependencia espacial de cada variable, es decir, su auto correlación espacial es con el apoyo del Variograma (Cañada, 2008).

²Ésta es la misma para el IDW, sólo que se ha cambiado la representación de asignación de peso para evitar confusión.

El variograma o semivariograma es la herramienta básica para la interpretación estructural del fenómeno a estudiar, así como para la estimación de valores. La gráfica de las semivarianzas representa la medida del grado de dependencia espacial entre dos puntos muestrales, siempre en función de la distancia. Su estimación se expresa así:

$$\gamma(s_i, s_j) = \frac{1}{2} \text{var} (z(s_i) - z(s_j))$$

El semivariograma lo estructuran los siguientes elementos: la meseta o *still* es la máxima semivarianza encontrada entre pares de puntos, es un valor igual a la varianza media; el rango es la distancia a la que deja de apreciarse un aumento de valores, por lo tanto, indica la distancia a partir de la cual las muestras son espacialmente independientes unas de otras; y, la pepita o efecto *nugget* corresponde a la varianza no explicada por el modelo, se conoce también como varianza error. La Figura 3.5 es ilustrativa de los componentes explicados.

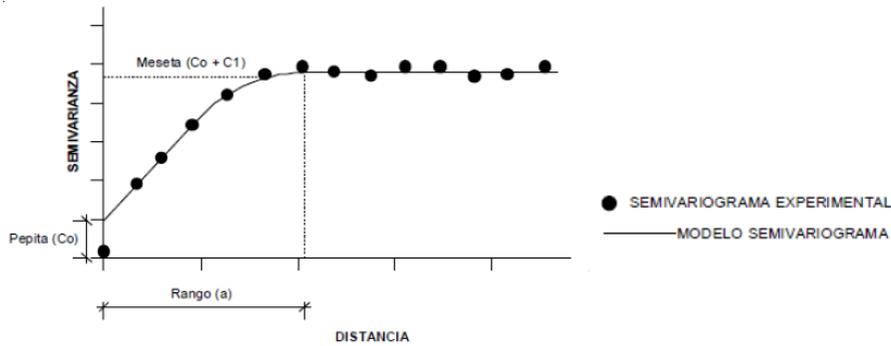


Figura 3.5 Parámetros de semivariograma

Fuente: Abad, 2014:47

Al representar el fenómeno en el eje Y se encuentran la mitad de las diferencias al cuadrado entre cada par de puntos; mientras que el eje X permite visualizar la distancia que los separa. La graficación de los casos de estudio lleva al semivariograma experimental; sin embargo, para efectuar la predicción de un valor no muestral es necesario el ajuste a un modelo matemático conocido como semivariograma teórico. Para cuantificar el grado y escala de variación espacial, éste debe ser lo más parecido al comportamiento de los datos. Los modelos básicos más utilizados son el esférico, el exponencial y el gaussiano (Figura 3.6).

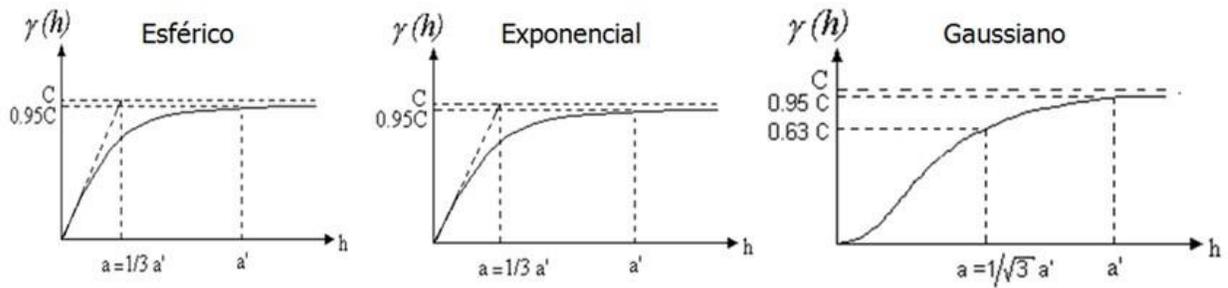


Figura 3.6 Modelos teóricos del semivariograma

Fuente: Giménez *et al.* (2014: 77)

El modelo esférico es uno de los más utilizados y se caracteriza por un crecimiento inicial casi lineal en el origen. Su ecuación es:

$$\gamma(h) = C \left[\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right], \text{si } h < a$$

Mientras que el exponencial se comporta de manera similar que el anterior sólo que tiene un crecimiento más rápido. Al comienzo está dado por:

$$\gamma(h) = C(1 - e^{-h/a})$$

Finalmente, el gaussiano inicialmente muestra un comportamiento parabólico, por lo que representa un fenómeno extremadamente continuo, su representación está proporcionada por la ecuación:

$$\gamma(h) = C[1 - e^{-h^2/a^2}]$$

Es preciso indicar que el comportamiento del semivariograma puede variar al ser calculado en distintas direcciones. De presentarse este caso se dice que existe anisotropía espacial. De no ser así se evidencia isotropía, es decir, que la variable será consistente y no tendrá influencia espacial más marcada en un sentido que en otro.

Luego de conocer las características generales de los métodos seleccionados y antes de efectuarlos, Cañada *et al.* (2014) recomienda realizar tres procesos previos:

- 1) Realizar un análisis exploratorio de los datos muestrales donde se obtienen las propiedades de centralidad, dispersión y forma de su distribución.
- 2) Aplicar un análisis estructural de los mismos mediante la construcción del semivariograma.
- 3) Aplicar los dos métodos de interpolación seleccionados, confrontar sus resultados y dirimir la aceptabilidad de cada uno de ellos adoptando criterios estadísticos convencionales tales como la bondad de ajuste.

El objetivo de lo anterior es justificar qué método de interpolación proporciona los menores errores y a la vez presenta una distribución espacial compatible y coherente con el marco territorial de estudio.

Los procesos de interpolación se generaron mediante el *software* ArcGis versión 10.2.2, el cual dentro de *ArcMap* requiere activar la extensión *GeostatisticalAnalyst* (Figura 3.7); esta extensión cuenta con tres menús:

- *Explore Data* (Exploración de datos) da acceso a una serie de gráficos para la exploración de datos espaciales.
- *Geostatistical wizard* (Asistente geoestadístico); donde se efectúa el proceso de creación y evaluación de un modelo de interpolación.
- *SubsetFeatures* (Características del subconjunto) crea un modelo de validación subdividiendo los datos.

En este trabajo únicamente fueron necesarias las dos primeras opciones.

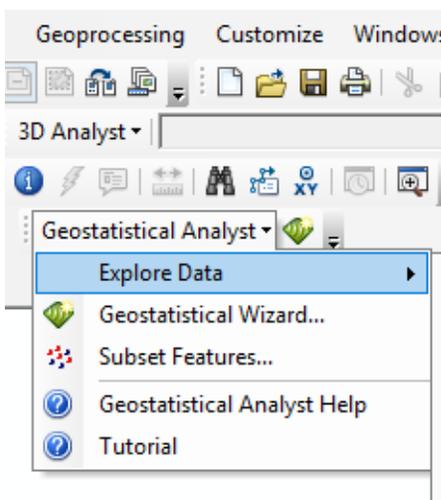


Figura 3.7 Extensión *GeostatisticalAnalyst*

Fuente: ArcMap 10.2.2

3.2.4.1 Análisis exploratorio de datos

La exploración de datos permite identificar y caracterizar el SPI; para ello se usó el menú Exploración de datos, el cual proporciona los gráficos para conocer las propiedades estadísticas de las 48 estaciones climáticas de Zacatecas seleccionadas en este estudio.

El primer gráfico que se obtiene es el histograma; éste proporciona una descripción univariada de los datos donde la distribución de frecuencias cuenta con un cuadro que refiere la centralidad, la dispersión y la forma. Siguiendo el orden anterior, la media aritmética de los datos fue -1.5042, lo cual demuestra que el centro de la distribución corresponde a un valor de SPI₉ equivalente a la categoría de severamente seco. Por su parte, la desviación estándar de +0.95 refiere una agrupación importante en torno al valor medio; por último, en los indicadores de forma se observa una media mayor a la mediana, por lo que la distribución cuenta con un sesgo positivo y curtosis³ de 2.6642, indicativo de una ligera tendencia a la distribución platicúrtica, es decir, un menor grado de concentración de frecuencias que el normal (Figura 3.8, "a").

El gráfico siguiente (Figura 3.8, "b") es la probabilidad normal (*Normal QQ plot*) para medir el ajuste de los datos a una distribución normal, así la línea recta refleja el seguimiento teórico del SPI₉, mientras que los puntos expresan el valor real. En este caso el ajuste es bueno en la mayoría de los casos, solamente en los extremos se observa un menor acoplamiento. Es importante que los datos se apeguen a una distribución normal, ya que en el caso de los métodos geoestadísticos sólo se consideran óptimos si la variable de estudio perfila una distribución normal (Figura 3.8, "b"). De lo contrario, será necesario realizar una transformación a partir de alguna de las dos que considera el *Analista Geoestadístico*: Box-Box y Logarítmica.

El último gráfico que se consideró en este apartado es el referente al "Analista de Tendencias" (*Trend Analyst*), cuyo objetivo es identificar comportamientos globales mediante un esquema de tres dimensiones, donde es posible identificar si los datos se ajustan a funciones de primero, segundo o tercer orden. En este sentido, los puntos muestrales se distinguen en un plano **X, Y** y el valor del SPI₉ está representado por un vector en **Z**. La única característica de esta herramienta es que los valores son proyectados en dos direcciones: la norte-sur (línea azul) en un plano **Y, Z** y al este-oeste (línea verde) sobre un

³ La curtosis mide el grado de concentración que presenta la distribución de frecuencias en la región central de la distribución. Puede ser mesocúrtica cuando toma un valor de tres y se caracteriza por una distribución normal (considerando la forma de la Campana de Gauss); en cambio, con un valor mayor a tres se le denomina leptocúrtica, refiriendo una mayor distribución de valores en la región central; por último, si el valor de curtosis es menor a tres se dice que la variable es platicúrtica, es decir, hay un menor grado de concentración en torno de los valores medios.

plano X, Z. Para ese fin en cada plano lateral se ajusta un polinomio y las curvas son representadas sobre los gráficos (Cañada, *op. cit.*: 762).

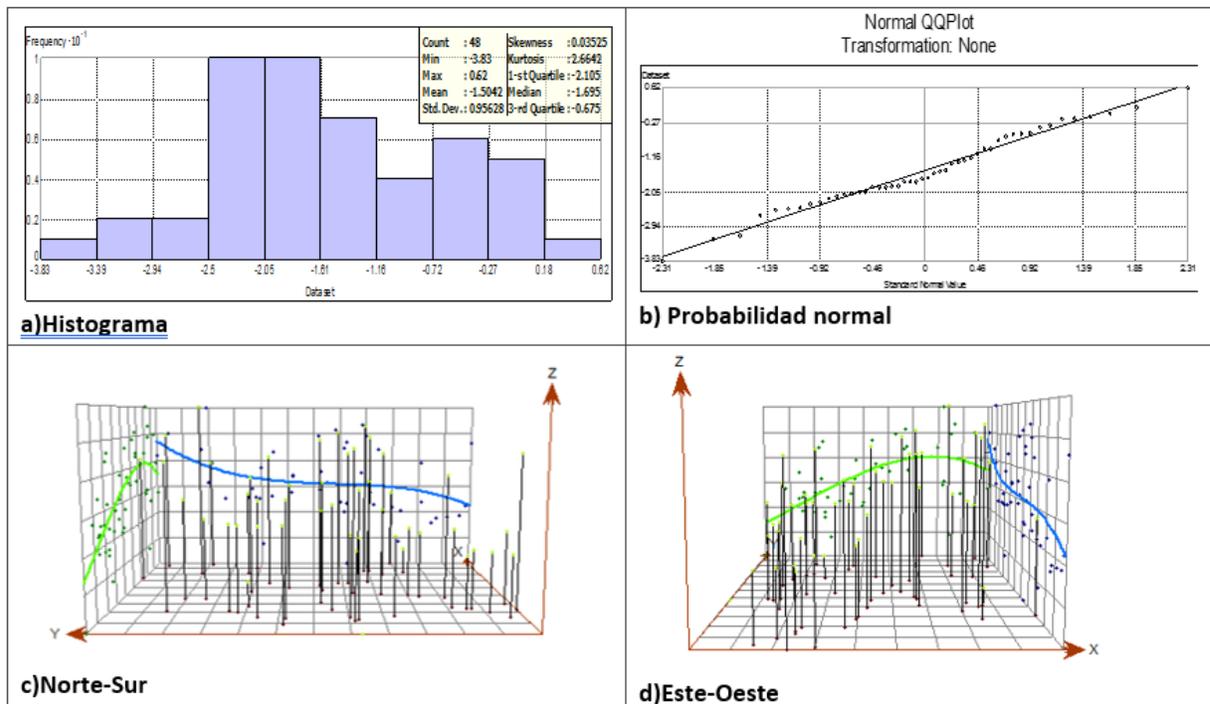


Figura 3.8 Gráficos concernientes al análisis, a la exploración de datos: a) Histograma de frecuencias, b) Probabilidad normal, c y d) Análisis de tendencias en las direcciones norte-sur y este-oeste respectivamente.

Fuente: Elaboración propia con base en estaciones climáticas seleccionadas

En relación con lo anterior, los valores de ambas direcciones se modelaron a un polinomio de tercer orden, ya que éste fue el que dio mejores resultados visuales. De manera específica, en lo que respecta al norte-sur se observa que los valores de SPI₉ al norte son mayores, mientras que al sur tienden a disminuir, es decir, las condiciones de mayor sequía se ubican en este sentido, pues mientras más disminuya el valor del índice mayor será el grado de sequía. Finalmente, al este-oeste los valores mínimos se concentran en el oeste (Figura 3.8, "c y d").

Al efectuar la exploración de datos se sabe que la muestra se distribuye de una forma casi normal, por lo cual no fue necesario aplicar ninguna transformación, además, con ayuda del *TrendAnalyst* se espera que al emplear los métodos de interpolación las áreas con mayor grado de sequía estén al sur y al oeste del estado.

3.2.4.2 Análisis estructural (cálculo y modelado de superficie)

La etapa de análisis estructural se asocia a la exploración del semivariograma, el cual cuantifica la dependencia espacial del SPI₉, es decir, su autocorrelación. Esta etapa se desarrolló mediante el menú Exploración de datos del cual es posible obtener el semivariograma experimental. En el mismo, el eje de las Y muestra la varianza de cada par de puntos, en tanto en el eje de las X se observa la distancia que los separa.

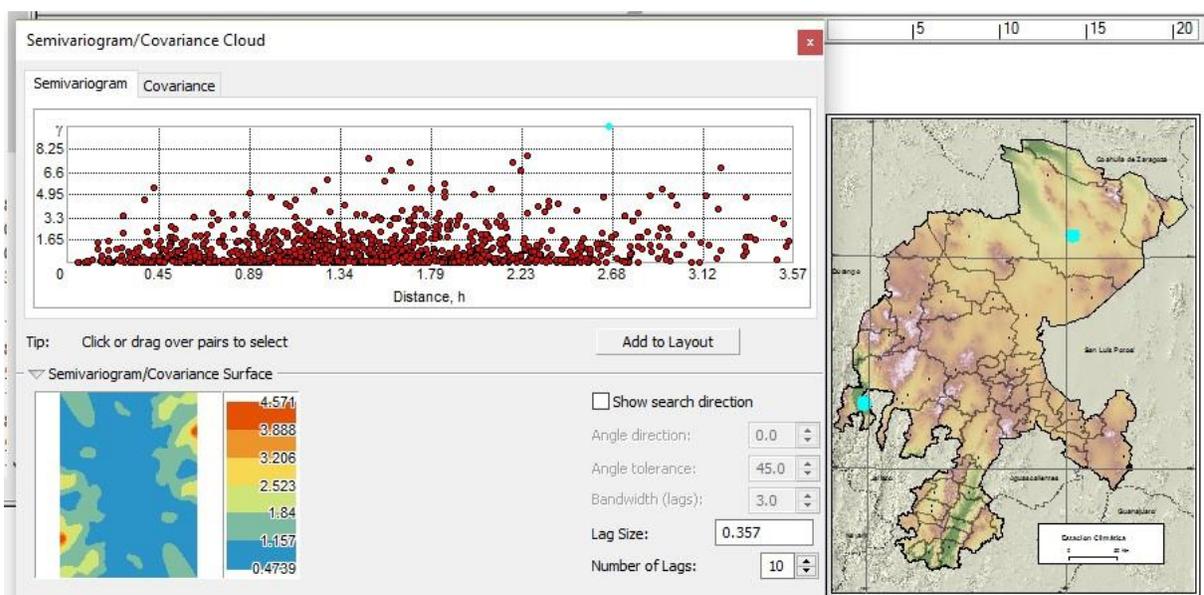


Figura 3.9 Semivariograma empírico de SPI₉

Fuente: Elaboración propia

En este context, la Figura 3.9 permite observar que la nube de puntos se ajusta a una varianza que va de 1.65 a 8.25 agrupada en diez *lags* o intervalos, con un tamaño de 37.5 km cada uno; por lo que es posible apreciar que la mayor varianza (o *still*) se da entre las estaciones climáticas de El Platanito (municipio de Valparaíso) y Gruñidera (en Mazapil). Entre este par de puntos existen las mayores diferencias de SPI₉, con valores de -3.83 y

0.632, respectivamente. En el caso de la distancia se deja de apreciar aumento de la varianza (*rango*) a los 268 km, valor también coincidente con las estaciones antes enunciadas. Por lo tanto, los pares de puntos a partir de este trayecto se consideran espacialmente independientes unas de otras.

3.2.4.3 Predicción de la superficie y valoración de los resultados

Después de tener una aproximación del comportamiento global de los datos y haber explorado el semivariograma, el siguiente paso es propiamente efectuar los métodos de interpolación. En este sentido, en ambos casos, los parámetros a considerar fueron los que mejor ajuste tuvieron sobre los datos y, por ende, arrojaron un menor error.

Conforme con lo anterior, la representación de categorías asociadas a la intensidad del SPI₉ está basada en los rangos planteados originalmente en dicho indicador, solamente se ajustaron a los valores que se encuentran dentro de la muestra, es decir de +0.62 a -3.83, por lo tanto, hay cuatro magnitudes de sequía: cercana a la normal, moderada, severa y extrema, representadas todas ellas en el Cuadro 3.4.

Cuadro 3.4 Categorías de intensidad de SPI₉

SPI	Clasificación	Color
-0.99 a 0.99	Cercano a lo normal	Amarelo
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco	Amarelo claro
-1.5 a 1.99	Severamente seco	Amarelo oscuro
≤-2.0	Extremadamente seco	Rojo

Fuente: Elaboración propia con base en Mckee et al. (1993)

Si equiparamos estas categorías a los rangos que señala el Diario Oficial de la Federación (22 de noviembre de 2012), las características de cada uno en torno a las afectaciones en el ámbito agrícola serán las siguientes:

- Anormalmente Seco (D0) o cercano al normal. Se trata de una condición de sequedad, no es un tipo de sequía. Se presenta al principio o cuando no haya sequía. Al principio de la sequía: debido a la sequedad de corto plazo hay retraso de la siembra de cultivos anuales, limitado crecimiento de los cultivos o pastos, riesgo de incendios por arriba del

promedio. Al concluir la sequía: déficit persistente de agua, pastos o cultivos no recuperados completamente.

- Sequía Moderada (D1) o moderadamente seco. Se presentan algunos daños a los cultivos y pastos, alto riesgo de incendios, niveles bajos en arroyos, embalses y pozos, escasez de agua. Se requiere uso de agua restringida de manera voluntaria.
- Sequía Severa (D2) o severamente seco. Existe en el momento que se dan probables pérdidas en cultivos o pastos, muy alto riesgo de incendios, la escasez de agua es común. Se recomienda se impongan restricciones de uso del agua.
- Sequía Extrema (D3) o extremadamente seco. Se dan mayores pérdidas en cultivos o pastos, peligro extremo de incendio, la escasez de agua o las restricciones de su uso se generalizan.

Luego de este contexto, la interpolación por IDW contempla una zona de influencia referida a un círculo donde aparecerán un mínimo de dos vecinos y un máximo de cinco; la manera en la que el peso disminuye en relación con la distancia está dada por $p=2^4$.

El resultado de este procedimiento se aprecia en la figura 3.10, donde las áreas con menor intensidad de sequía o aquellas cercanas a la normal se ubican al norte y este de Zacatecas, tal como se pudo apreciar en las gráficas referentes al *TrendAnalyst*. En este contexto, hay que recordar que al norte predominan los climas árido semicálido (BSohw), árido templado (BSokw y BSokx') y muy áridos semicálidos (BWhw); mientras, al este también encontramos una porción de árido templado (BSokw), razón por la cual en el periodo de estudio su baja precipitación respecto a la "normal" no se considera tan atípica. Municipios como: General Francisco R. Murguía, Melchor Ocampo, Mazapil, Concepción del Oro, Ojo Caliente, Villa Hidalgo, entre otros, son representativos de esta categoría.

En contraste, al suroeste la sequía tiende a intensificarse hasta llegar a su condición de extrema. Es visible que las áreas de mayor afectación corresponden en gran medida a las partes del territorio caracterizadas con climas semicálidos subhúmedos (A)C(w1) y (A)C(w0), cálidos subhúmedos (Aw1 y Aw0) y a los templados subhúmedos C(w0), C(w1), C(w2). Algunos de los territorios dentro de esta categoría son: Valparaíso, Saín Alto, Monte Escobedo, Benito Juárez, etcétera.

⁴ En la explicación del método IDW se menciona que el exponente de ponderación está representado por " β "; sin embargo, dentro de la extensión Analista Geoestadístico se representa por la letra " p ".

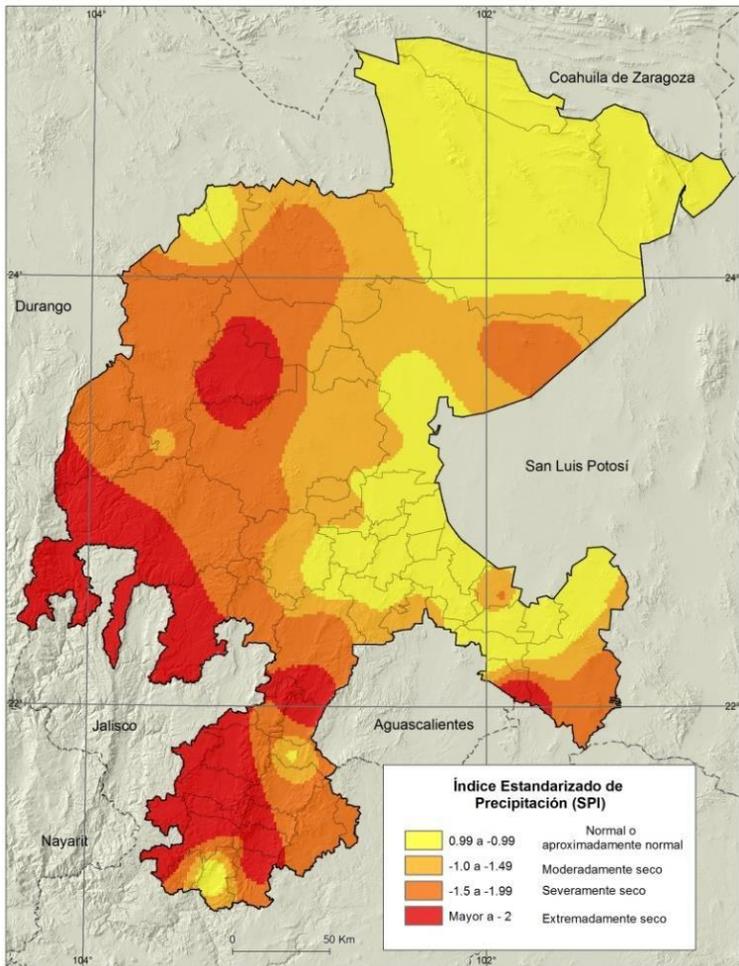


Figura 3.10 Intensidad de SPI_t por interpolación IDW

Fuente: Elaboración propia

La siguiente etapa de análisis contempla la técnica del *kriging*, para la cual se optó por el tipo ordinario, el cual asume que la variable es estacionaria y sin tendencia.

Lo anterior se expresa:

$$Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s)$$

Donde:

- Z(s) = variable de interés
- $\mu(s)$ = constante (media) desconocida
- $\varepsilon(s)$ = errores aleatorios
- s = indica el lugar con determinadas coordenadas espaciales (x, y)

En este caso, la suma de los pesos debe ser igual a la unidad para que la esperanza del predictor sea igual a la esperanza de la variable. Lo anterior se conoce como requisito de insesgamiento.

Además, como señala Cañada (*op. cit.*: 454), para asegurar un mínimo error en la estimación se añade el multiplicador de *Lagrange* (m). Así, para hallar los pesos del modelo es necesario resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\Gamma * \lambda = g_0 \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \dots & \gamma_{1N} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \\ \gamma_{N1} & \dots & \gamma_{NN} & \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{N0} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Donde:

Γ = es la matriz de los valores del semivariograma teórico

λ = es el vector de pesos que tenemos que hallar

g = es el vector de las semivarianzas teóricas de cada uno de los puntos muestrales con el punto a predecir

Los pesos λ_i se determinan al calcular la matriz inversa de Γ : $\lambda = \Gamma^{-1} * g$. Para calcular el vector g encontramos la distancia entre los vecinos y el punto que se va a interpolar mediante la fórmula de la distancia euclidiana. Después se calcula la semivarianza teórica (valores γ) correspondiente a esas distancias con los parámetros proporcionados por el modelo teórico de ajuste; en este caso es el esférico.

Finalmente, para el *kriging* ordinario se hace uso de la ecuación de predicción:

$$\hat{z}_j = \sum_{i=1}^n \lambda_i * z_i$$

Luego de conocer el proceso a seguir del método, el cual dará como resultado la superficie continua de SPI₉, se procedió a introducir la muestra de las 48 estaciones climáticas a las cuales no se consideró necesario aplicar una transformación, ya que su distribución fue muy cercana a la normal. Como ya se mencionó, los valores del semivariograma se ajustaron al modelo esférico, mientras que el radio de búsqueda fue circular con un máximo de cinco vecinos y un mínimo de dos.

La distribución resultante se observa en la Figura 3.11, donde es posible apreciar una asignación de categorías muy similar en general a las del IDW, ya que en el norte y al este se aprecia una menor intensidad de sequía, mientras que el suroeste fue la porción del territorio más afectada bajo la condición de extremadamente seco.

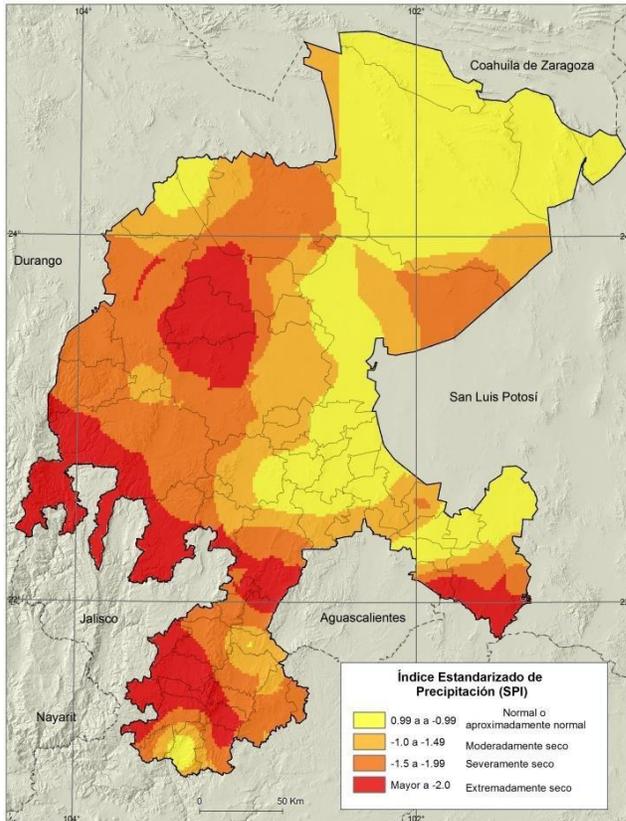


Figura 3.11 Intensidad de SPI_t por interpolación *kriging*

Fuente: Elaboración propia

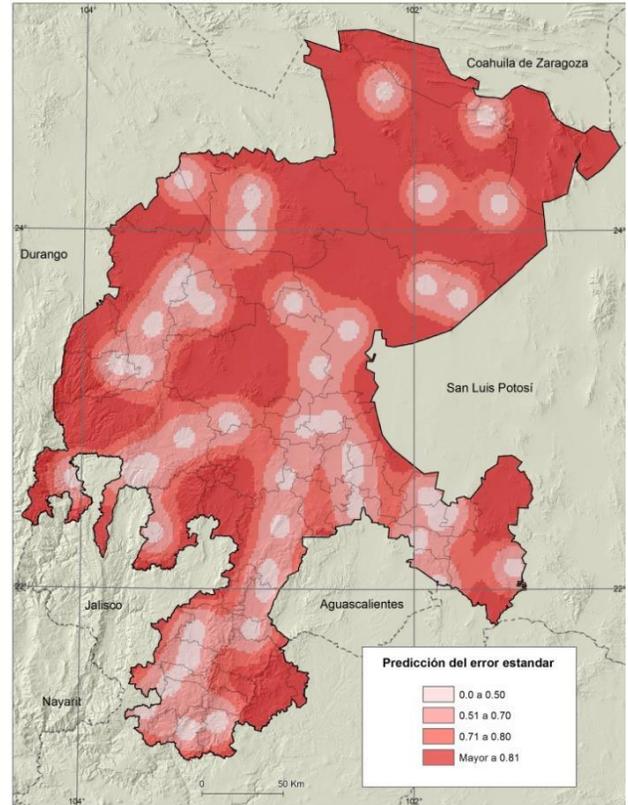


Figura 3.12 Predicción del error estándar por método *kriging*

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, dentro del modelo es posible distinguir, quizá por el proceso de expansión, que se aplicó para cubrir la totalidad del estado, irregularidades o anomalías que se explican por falta de estaciones climáticas. En este sentido, la Figura 3.12 es de mucha ayuda porque muestra la distribución de la predicción del error estándar, valor que confirma dichos valores discontinuos coincidentes con porciones donde el error de predicción superó el 85 %.

Después de conocer los resultados espaciales de los métodos de interpolación IDW y *kriging*, también es necesario contrastarlos mediante una validación cruzada (*crossvalidation*), la cual da idea del ajuste que tuvo cada modelo. Esto se logra quitando un punto muestral, luego se predice con el resto de la muestra y finalmente se compara el valor predicho con el observado. Los resultados se aprecian en las gráficas de la Figura 3.13.

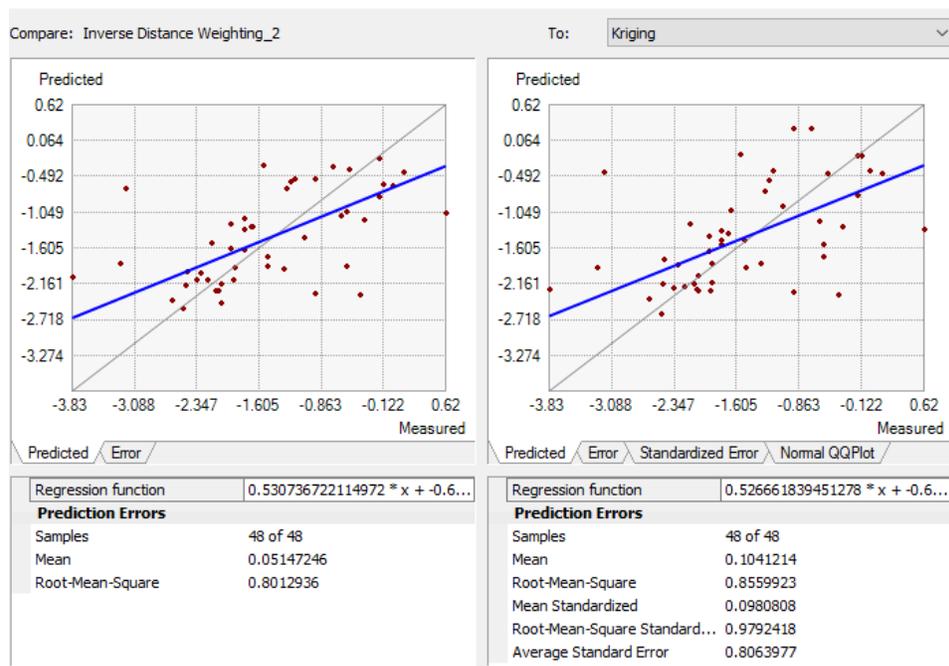


Figura 3.13
Comparación de Validación cruzada del error en los métodos IDW y *kriging*

Fuente: Elaboración propia

En este contexto, los parámetros de comparación en ambos métodos son: la media de los errores (*mean*), la cual debe estar muy cercana a cero para que las predicciones sean insesgadas; y, el error cuadrático medio (*Root-Mean-square*), resultado de las sumas de las distancias cuadradas entre los valores medidos y los predichos. En este caso, mientras más pequeño sea el valor de la predicción más se aproximará al valor real.

Bajo la tesis anterior, el mejor modelo de interpolación del SPI₉ fue el IDW, ya que resultó con una media de 0.051, valor menor a la del *kriging* (valor de 0.104); por otra parte, su error cuadrático medio (de 0.80) también fue inferior al 0.855. Adicionalmente, en la representación espacial no contó con irregularidades significativas; por lo tanto, la representación cartográfica a considerar en procedimientos posteriores será la efectuada con base en el IDW.

3.3 Superficie agrícola siniestrada: ciclo primavera-verano, 2011

Al final del segundo capítulo de esta investigación se explicó con algún detalle cuáles fueron las zonas y municipios del estado de Zacatecas que sufrieron mayores pérdidas de cosechas durante el ciclo primavera-verano, en tierras de temporal, durante 2014. Se tomó en cuenta ese año ya que reportó una precipitación pluvial cercana al promedio. De esa forma se posibilitó visualizar la siniestralidad “típica” en las diversas porciones de esa entidad sin enfrentar momentos de sequía sustancial. Tal y como se destacó en el apartado respectivo, las pérdidas “normales” alcanzaron poco más del 9 % de la superficie sembrada, valor poco relevante, pero que duplicó el promedio nacional, circunstancia con la cual fue posible identificar a Zacatecas como un caso estatal con alta probabilidad de siniestralidad.

Ahora corresponde precisar con detalle las pérdidas de sembradíos reportadas a nivel municipal durante 2011, año donde el Diario Oficial de la Federación (DOF) reportó que se presentó la peor sequía en los estados del norte y centro del país desde 1941, la cual afectó a 1213 municipios de 19 entidades federativas (DOF, 25 de enero de 2012).

Específicamente, para Zacatecas, esta misma institución emitió una declaratoria de Desastre Natural por la sequía atípica ocurrida del 1 de junio al 31 de agosto de 2011. Este documento especifica que, debido al fenómeno mencionado, fueron afectados 51 de los 58 municipios del estado (DOF, 26 de julio de 2012).

Para reforzar las afirmaciones de presencia de sequía en Zacatecas durante 2011, fue necesario construir la Figura 3.14, donde se hace la comparación del SPI a 6, 9 y 12 meses durante el periodo de estudio, el cual comprende de 1980 a 2012. La primera cuestión que se identifica es un comportamiento sinusoide del fenómeno; en este trabajo lo relevante son los valles, los cuales indican un déficit de precipitación respecto al promedio. En este sentido, es posible apreciar dos importantes momentos de carencia de lluvia: uno en el año 1989 y el otro en 2011, ambos con incidencias que sobrepasan el -1.5 de intensidad del SPI, correspondiente a una sequía severa.

La diferencia de los años antes mencionados radica en que, si bien 1989 fue un año severamente seco, sólo se reporta este comportamiento con un SPI a seis meses; ahora bien, cuando el periodo se amplía con un índice a 9 y 12 meses el grado de sequía disminuye notablemente, llegando a un comportamiento que corresponde al promedio (0.99 a -0.99). En cambio, en 2011 los tres lapsos sobrepasan el -1.5, lo cual corrobora los reportes de sequía severa en Zacatecas, al menos durante los treinta y dos años que comprende este estudio.

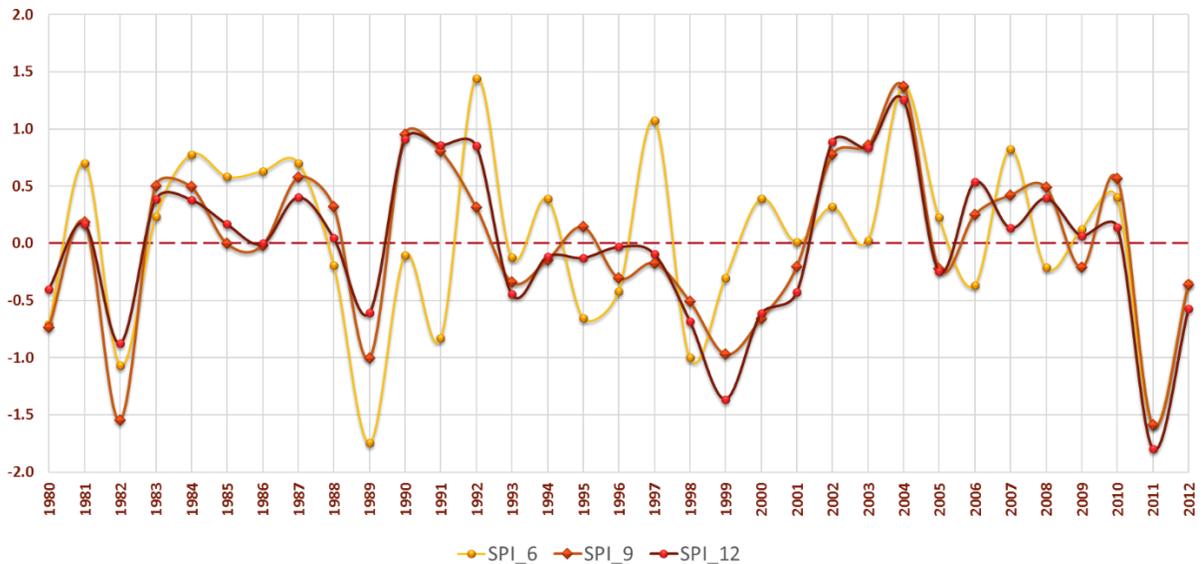


Figura 3.14 Estado de Zacatecas comportamiento de SPI, 1980 a 2012

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN-CONAGUA, 1980 a 2012

Luego de precisar por qué la relevancia del periodo de estudio, de manera adicional, es necesario definir que el análisis de superficies agrícolas de los capítulos anteriores tiene como base la superficie cosechada. Sin embargo, al abordar el tema de siniestralidad se requiere cambiar esa variable por la de superficie sembrada, ya que este último parámetro es el principal referente para determinar el alcance de las pérdidas registradas.

3.3.1 Clasificación municipal por superficie agrícola siniestrada

Para el análisis a escala municipal se pueden tomar como punto de partida las cifras del SIAP (2016), las cuales reportaron una superficie sembrada de 932 mil hectáreas (ha) en tierras de temporal de todo el estado para el ciclo primavera-verano de 2011. Fueron suficientes sólo seis de los 58 municipios zacatecanos para conjuntar poco más de la mitad de la superficie sembrada de todo el estado, donde sobresalió Sombrerete (143 mil ha), seguido por Fresnillo (87 mil ha), Río Grande (79 mil ha), Pinos (71 mil ha), Miguel Auza (56 mil ha) y General Francisco R. Murguía (52 mil ha). En términos generales esa jerarquía sigue el patrón de sembradíos explicado y analizado en el apartado 2.3.2 del segundo capítulo.

Al considerar la superficie siniestrada se evidencia lo difícil de ese año para la agricultura local al perderse un promedio de 63 % del total sembrado en terrenos de temporal del ciclo primavera-verano. A primera vista ese porcentaje es demostrativo de una situación muy adversa para el agro local. Sin embargo, una revisión a mayor detalle permite encontrar particularidades que conviene mencionar.

Cuadro 3.5 Estado de Zacatecas: Relación superficie sembrada y siniestrada en mayores

Nombre del municipio	Superficie Sembrada (ha)	Superficie Cosechada (ha)	Superficie Siniestrada (ha)	Superficie Siniestrada (en %) vs. Superficie Sembrada (ha)
Sombrerete	142,926	114,381	28,545	20.0
Fresnillo	87,510	29,693	57,817	66.1
Río Grande	79,875	46,231	33,644	42.1
Pinos	71,084	24,085	46,998	66.1
Miguel Auza	55,790	47,470	8,320	14.9
General Francisco R. Murguía	51,567	0	51,567	100.0

Fuente: Cálculos propios con datos del SIAP, 2016

La información del Cuadro 3.5⁵ demuestra que los mayores productores (en términos de la superficie sembrada) no necesariamente sufrieron las mayores pérdidas. Por ejemplo, el municipio principal (Sombrerete con más de 142 mil ha sembradas) sólo reportó un 20 % de superficie siniestrada. Otro caso protagónico fue Miguel Auza (con más de 70 mil ha sembradas) con pérdidas por debajo del 15 %. En una situación intermedia, Río Grande alcanzó 42 % de cultivos siniestrados, en tanto que Pinos y Fresnillo llegaron a 66 %. Así, de los seis mayores productores únicamente General Francisco R. Murguía perdió la totalidad de sus cosechas.

Es importante generalizar el comportamiento de los municipios tal y como se muestra en el Cuadro 3.6, con el fin de observar el número de casos clasificados de acuerdo con el grado de siniestralidad que registraron. La información del tabulado permite concluir que cada una de las tres categorías en las cuales se agruparon las pérdidas de superficie abarcó, de manera aproximada, una tercera parte del área agrícola estatal.

⁵Nota: Las cifras respectivas corresponden al ciclo primavera-verano 2011 en tierras de temporal.

Cuadro 3.6 Estado de Zacatecas: Número de municipios clasificados por porcentaje de siniestralidad, 2011

Rango de Superficie Siniestrada (en %)	Número de municipios	Superficie Sembrada (ha)	Porcentaje de Superficie Sembrada	Superficie Siniestrada (ha)	% de Superficie Siniestrada
de 80.0 a 100.0	29	320,944	34.4	301,321	51.6
de 59.7 a 79.9	12	294,137	31.6	201,593	34.5
de 0.0 a 43.7	17	316,943	34.0	81,320	13.9
Estado de Zacatecas	58	932,023	100.0	584,234	100.0

Fuente: Cálculos propios con datos del SIAP, 2016

Por otra parte, se identificaron 29 municipios que sufrieron la mayor afectación como producto de la drástica sequía registrada en el año 2011. Como se explicó antes, al tiempo que ellos sumaron poco más de la tercera parte de la superficie sembrada del estado, acumularon algo más de la mitad de las pérdidas. Es claro que se trató de municipios donde los daños alcanzaron su mayor intensidad al ubicar siniestralidad entre 80 y 100 % de la superficie sembrada. Sin embargo, a pesar de enfrentar una de las sequías más significativas de la historia reciente, los niveles de pérdida más sustanciales no afectaron la totalidad de Zacatecas. En principio abarcaron básicamente a ese tercio de su territorio.

Para un segundo grupo formado por 12 casos municipales, el área sembrada resultó proporcional a la superficie perdida (34 % del total), con afectación menos sustancial al quedar todos ellos clasificados con siniestralidad de entre 59.7 y 80 % del total, en términos de los sembradíos de temporal.

Finalmente, el tercer grupo de 17 municipios tuvieron el menor nivel de pérdida ya que ninguno superó el 44 % de siniestralidad. Si bien ocuparon 34 % de la suma de tierras sembradas únicamente concentraron 14 % del total de las pérdidas.

Los párrafos anteriores sintetizan los resultados del análisis estadístico inicial efectuado con datos sobre superficie siniestrada. A pesar de encontrar allí diversas evidencias que aportan información útil para la presente investigación, desde un abordaje geográfico todavía es necesario llevar el estudio de los casos municipales a un segundo plano analítico, ahora a partir de los patrones de distribución territorial que corresponden a cada una de las tres categorías de siniestralidad en las que se categorizaron los 58 casos municipales. Para ese fin, la Figura 3.15 es fundamental por representar a los municipios de acuerdo con la categoría

en la cual quedaron clasificados.

Lo primero que destaca en esta cartografía es el hecho de que cada una de las categorías perfiló regiones definidas y de notable homogeneidad sobre el territorio zacatecano. En el caso de la primera de ellas, con el menor nivel de pérdidas (de 0 hasta 43.69 % de la superficie sembrada), se encontraron los tres principales productores agrícolas, todos ellos localizados sobre el poniente de Zacatecas (Sombrerete, Río Grande y Miguel Auza). Aquí es necesario revisar el caso del municipio Juan Aldama, cercano a los seis principales productores agrícolas; el cual, a pesar de compartir elementos con ellos, quedó por muy poco fuera de este grupo. Otra región en la misma circunstancia se formó con otros trece municipios situados en el extremo sur.

Ese bajo nivel de siniestralidad, de los 17 casos referidos antes, se explicará con detalle más adelante. Por ahora es suficiente sugerir que las condiciones climáticas locales y la presencia de presas y bordos de embalse fueron dos de los principales factores para favorecer la presencia de esas zonas de excepción, relativamente libres de los efectos más adversos de la drástica sequía de 2011.

Al respecto del segundo grupo municipal, con pérdidas de mayor cuantía que el anterior (siniestralidad entre 43.7 y 79.9 %), se encontraron doce casos, distribuidos en tres áreas también específicas; dos de ellas de menor tamaño, una sobre el extremo oriental del estado con sólo dos municipios (Pinos y Noria de Ángeles); otra en el sur con tres casos (El Plateado de Juan Amaro, Tabasco y Huanusco) y la tercera formando una especie de corredor desde el extremo suroeste hasta la porción central del estado con seis unidades municipales. El único caso aislado de las regiones referidas fue Juan Aldama, el cual se explicó ya antes que fue un tanto inesperado encontrarlo fuera del primer grupo.

El tercer conjunto de municipios, el más numeroso de todos (29 casos), ocupó buena parte de la mitad oriental de Zacatecas, exceptuando el extremo sur. Prácticamente la mitad de esa extensa región la ocuparon algunos de los municipios de mayor tamaño, en especial los situados al norte (Mazapil, General Francisco R. Murguía y Villa de Cos), los cuales, tal y como se explicó en el segundo capítulo, su superficie sembrada alcanzó extensiones poco significativas debido a su baja capacidad agrícola. Además, en esta categoría se encontraron tres municipios que rompieron la continuidad regional. Los dos primeros están sobre el extremo poniente (Chalchihuites y Jiménez del Teúl), mientras el tercero se ubica al sur (Momax), sin ser claras las razones de esta ruptura en su continuidad geográfica.

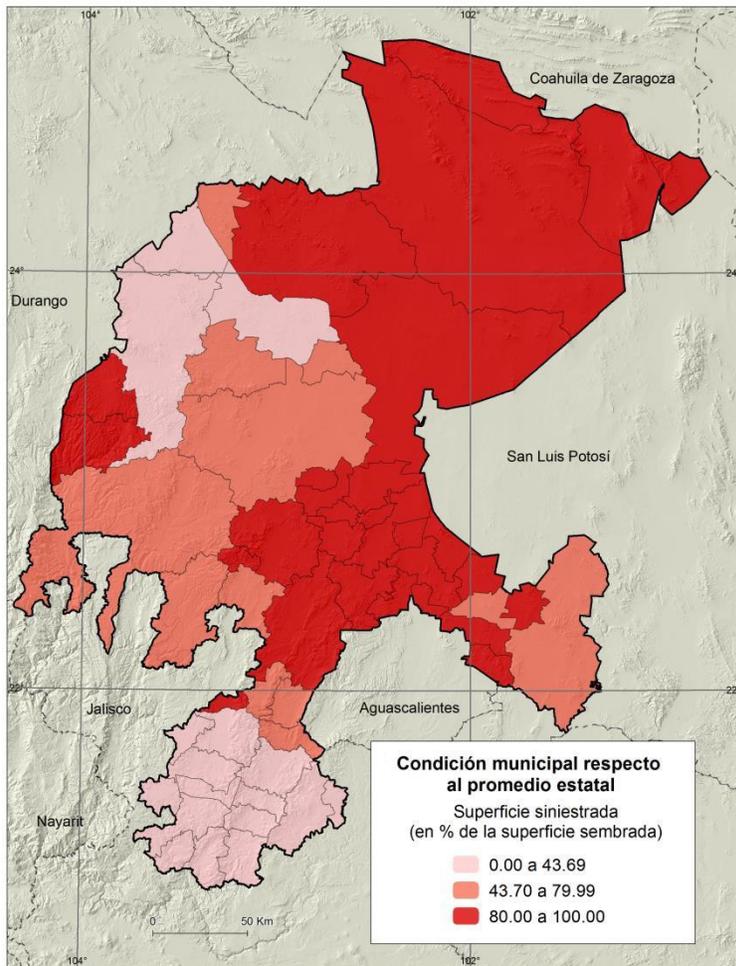


Figura 3.15 Estado de Zacatecas: Porcentaje de Superficie Siniestrada por municipio, 2011 (ciclo: primavera-verano, modalidad: temporal)

Fuente: Cálculos propios con datos del SIAP, 2016

Para terminar con el presente apartado, puede afirmarse que las regionalizaciones obtenidas a partir del porcentaje de superficie siniestrada pueden servir como una primera base territorial para compararlas con las zonas donde la sequía alcanzó sus mayores dimensiones, tal y como se contempla más adelante.

3.3.2 Análisis bivariado para determinar la relación entre superficie sembrada y siniestrada

Los elementos explicados en el apartado anterior, referentes a las pérdidas registradas en el año 2011, son útiles para identificar las zonas del estado que resultaron con mayor siniestralidad (o en varios casos, la totalidad de las cosechas). Sin embargo, por tratarse de un análisis unidimensional basado en el indicador de porcentaje de superficie siniestrada en relación con el total de superficie sembrada, sólo se posibilita visualizar los casos municipales según la proporción de superficie sin cosechar.

Con esos resultados no es factible establecer si aquellos que perdieron gran proporción de sus cultivos de temporal sembraron una extensión amplia (o no tanto) de su territorio. Para resolver esa limitante puede aplicarse un análisis bivariado, es decir, dimensionando dos parámetros a la vez.

De entrada es necesario definir cuáles serán las variables a correlacionar. Una de ellas debe ser la superficie sembrada municipal (en hectáreas), referente fundamental básico para el estudio. Con ese antecedente, una primera opción podría ser asociar el área sembrada con la variable de superficie siniestrada, ambas expresadas en hectáreas. Pero al hacerlo así se corre el riesgo de que a mayor superficie sembrada se encuentre una superficie siniestrada también de mayor tamaño, ante la lógica de que un municipio pequeño estará impedido de perder extensiones grandes de sembradíos, mientras que a la inversa esta posibilidad sí es viable. Como se puede observar, los resultados de esta primera alternativa de combinación serían, en el mejor de los casos, imprecisos.

Pero la superficie sembrada también puede compararse con el indicador que contempla el porcentaje de superficie siniestrada, en términos de la superficie sembrada original. Esta segunda opción es más prometedora, ya que permite identificar tanto los municipios según la extensión agrícola sembrada, como el porcentaje perdido de la misma.

Una vez definidas la variables y el indicador a relacionar (en este caso la superficie sembrada y el porcentaje de superficie siniestrada), conviene señalar que esta técnica bivariante permite clasificar en cuatro categorías, o cuadrantes (García de León, 2012), el conjunto de 58 municipios correspondientes a Zacatecas; si para ello se trazan sobre los ejes cartesianos las líneas que representan los valores promedio de X e Y. De esa forma los cuadrantes tendrán significados específicos, los cuales se describen a continuación:

- Cuadrante I. Casos que superaron la media estatal, tanto en superficie sembrada como en porcentaje de superficie siniestrada.
- Cuadrante II. Casos inferiores al promedio en superficie sembrada y superiores en porcentaje de superficie siniestrada.
- Cuadrante III. Casos inferiores al promedio en los dos referentes.
- Cuadrante IV. Casos superiores al promedio en superficie sembrada e inferiores en porcentaje de superficie siniestrada.
- Además de las combinaciones anteriores es viable delimitar una quinta, en la cual ambos parámetros tienen valores cercanos al promedio estatal.

El patrón de distribución de los municipios sobre los ejes cartesianos depende del valor que tome el coeficiente de correlación de Pearson (r). Por ejemplo, una correlación muy alta ($r=$

+0.992), como la representada en la Figura 3.16, provocará que todos los puntos (en nuestro caso son municipios) queden alineados sobre una recta y dentro de los Cuadrantes I y III. En contraste los dos cuadrantes pares quedarán sin caso alguno.

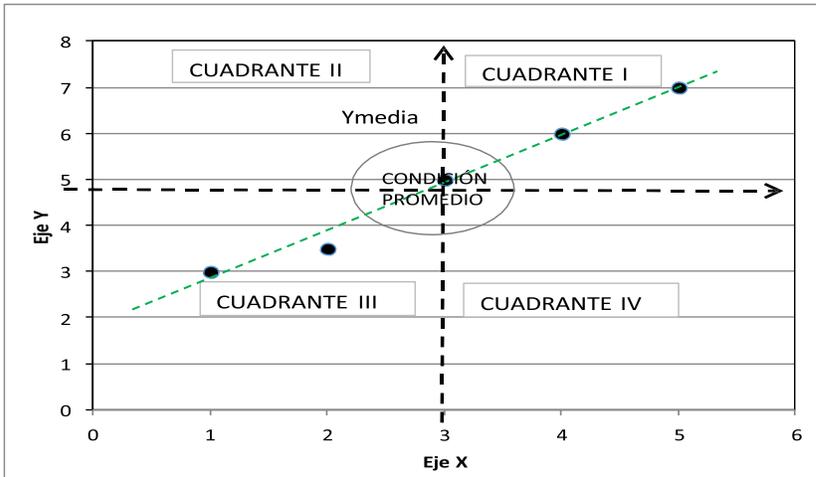


Figura 3.16 Distribución de casos en ejes X, Y con correlación alta

Fuente: Elaboración propia con base en García de León, 2012.

Otro ejemplo y una distribución por completo distinta se generará cuando el coeficiente sea cercano a cero ($r = -0.076$), valor indicativo de que los casos están perfilando un círculo o una elipse, como se presenta en la Figura 3.17. En esta circunstancia los municipios tienden a distribuirse sobre todo el cuerpo del diagrama de dispersión X, Y; de manera tal que será muy probable que cada uno de los cuadrantes presente al menos una de las unidades clasificadas mediante esta técnica clasificatoria.

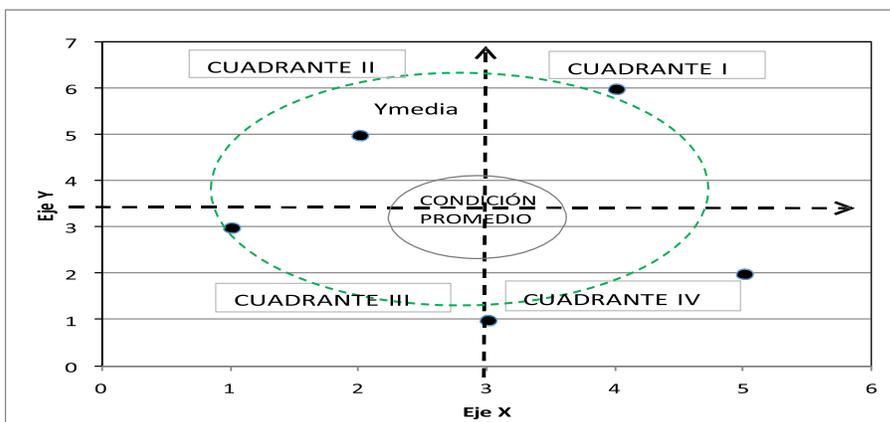


Figura 3.17 Distribución de casos en ejes X, Y con correlación baja

Fuente: Elaboración propia con base en García de León, 2012

Al aplicar este procedimiento estadístico a los municipios de estudio se obtiene la Figura 3.18⁶. Tal y como se puede apreciar en ella, por conveniencia las unidades de los dos ejes se expresan en desviación estándar debido a que al transformar los valores originales de cada municipio (tanto de superficie sembrada como porcentaje de superficie siniestrada), de manera automática, el origen del nuevo sistema X, Y viene a ser “0” (cero), razón por la cual es suficiente trazar ya sin error posible las líneas que definen el promedio de cada una de las variables.

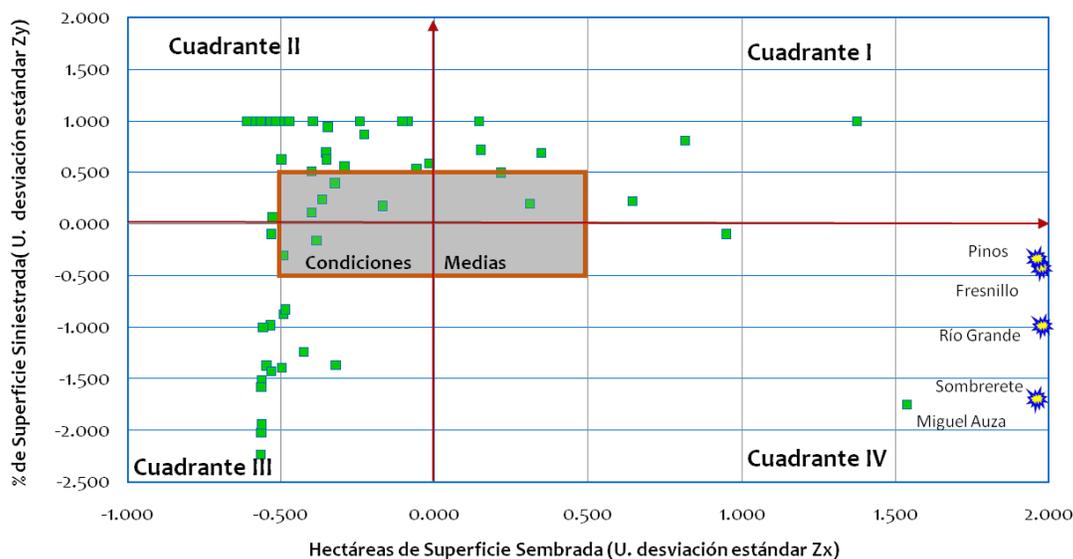


Figura 3.18 Estado de Zacatecas: Distribución de municipios en ejes X, Y ($r = -0.130$)

Fuente: Elaboración propia

El gráfico respectivo permite observar la distribución de municipios en las cinco zonas del gráfico; patrón esperado y anticipado en el ejemplo de la Figura 3.16 ante un bajo valor del coeficiente de correlación de Pearson ($r = -0.130$). En particular y de nueva cuenta se destacaron los casos municipales de Pinos, Fresnillo, Río Grande y Sombraerete por el hecho de que su valor X (hectáreas de superficie sembrada) alcanzó una magnitud muy superior al promedio.

Otra ventaja del procedimiento bivalente es la posibilidad de representar en una cartografía adecuada cuál fue la localización territorial de cada municipio, en términos del cuadrante donde quedó asignado. De esta forma es viable probar si cada una de las cinco condiciones determinadas en el análisis correspondió a un patrón específico de distribución

⁶ Los valores promedio X, Y se representan con una flecha en cada eje coordenado.

espacial. Para ilustrar lo anterior se tiene la Figura 3.19, donde, ante todo, se destaca una tendencia de los casos de cada categoría a regionalizarse de manera consistente.

Ya se explicó antes que las condiciones más predecibles deberían ser las correspondientes a los cuadrantes uno y tres. De no existir factores antrópicos, además de los físico-naturales, sería de esperar que prácticamente todas las unidades municipales se situaran en ellos, favoreciendo una correlación cercana a +1.0. En el primero estarían los municipios con mayor superficie sembrada y que perdieron los mayores porcentajes de esta; por otra parte, los del tercer cuadrante serían aquellos donde a menor superficie sembrada tuvieron a la vez bajo porcentaje de siniestralidad.

En ese sentido, los casos en el primer cuadrante o primer grupo municipal (con 6 casos) formaron una región de tamaño mediano desde el sur hasta el noroeste de la entidad; la única excepción fue Sain Alto, separado de esa primera región por el municipio de Río Grande. El segundo grupo, correspondiente al tercer cuadrante (con 15 casos) abarcó el extremo sur del estado dando lugar a una regionalización muy clara.

Sin embargo, también se encontró un buen número de municipios que se alejaron del comportamiento “lógico”. De hecho, la mitad de los 58 casos analizados demostraron poco apego a las tendencias esperadas. Esa elevada cantidad de excepciones obliga a aceptar que se entrecruzan factores, ya sean estos naturales, institucionales o privados, que favorecen la presencia de circunstancias contrastantes en el agro de Zacatecas.

Dejando de lado el conjunto de ocho municipios calificados todos ellos en condiciones cercanas al promedio estatal (Huanusco, Villanueva, Tepetongo, Mariano Escobedo, Valparaíso, Cañitas del Pescador, Noria de Ángeles y Villa Hidalgo), se encontraron 23 en el segundo cuadrante (baja superficie sembrada y alto porcentaje de siniestralidad).

Ante un número tan elevado como el referido antes se explica que unos pocos de ellos se encuentren un tanto dispersos sobre el territorio zacatecano. Así sucedió con Momax y Tabasco (en el extremo sur) y con Chalchihuites y Jiménez del Teul (al poniente). En contraste con los anteriores se formó una región (con 15 casos) en esta categoría, cubriendo desde el oriente hasta el centro del estado. Otra más se integró con cuatro de los municipios localizados al norte (Mazapil, Melchor Ocampo, Concepción del Oro y El Salvador) dentro de una región homogénea. Estos casos hacen referencia a productores medianos y pequeños, así como a casos municipales de pequeña extensión territorial.

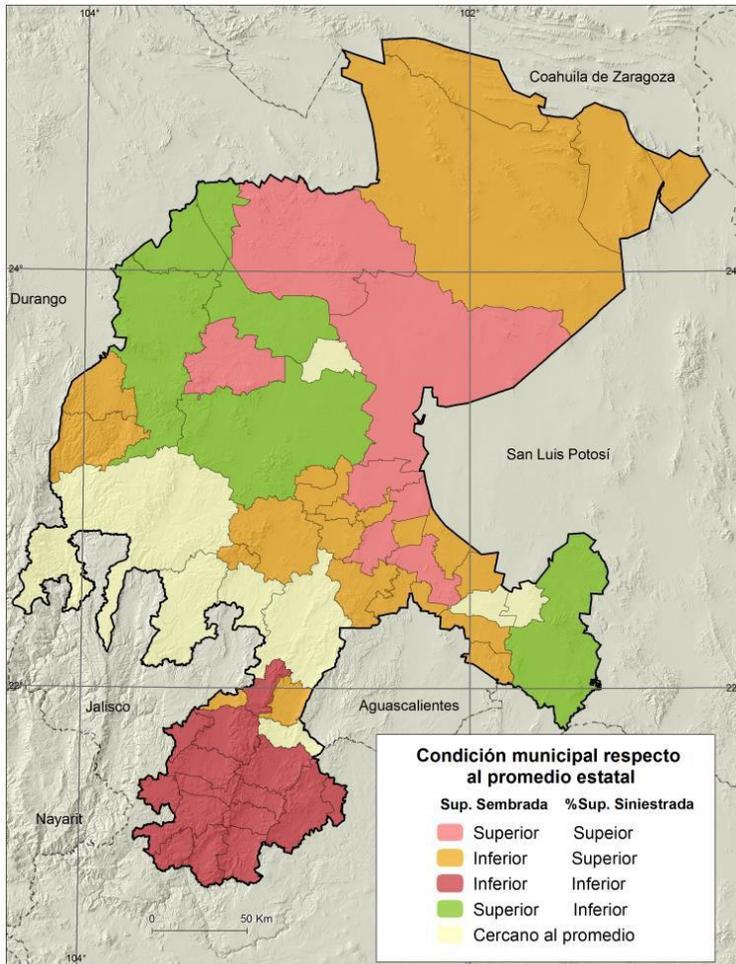


Figura 3.19 Estado de Zacatecas: Distribución municipal a partir del análisis bivariado

Fuente: Cálculos propios con datos del SIAP (2016)

Finalmente, el cuarto cuadrante ubicó los municipios con mayor superficie sembrada y menor proporción de superficie siniestrada con sólo seis casos (Pinos, Sombrerete, Fresnillo, Miguel Auza, Juan Aldama y Río Grande), casi todos (excepto Pinos) formando una región en el poniente de Zacatecas. A pesar de esa especie de vacío de casos en ese cuadrante, es importante señalar la particularidad de que integró a los mayores productores de frijol del estado de Zacatecas durante el ciclo agrícola primavera-verano de 2011. En conjunto los seis municipios referidos concentraron el 92 % de la superficie cosechada de esta leguminosa, Cuadro 3.7.

Luego de conocer tanto la distribución del porcentaje de superficie siniestrada, así como el porcentaje de superficie siniestrada respecto a la sembrada, se optó por utilizar los resultados del segundo caso como insumo de la siguiente etapa de esta investigación, ya que se considera que esta ofrece una aproximación más clara de los efectos adversos sufridos en la agricultura de temporal en el periodo de estudio. Así en los siguientes apartados se presenta el análisis efectuado para buscar cuál fue la posible relación existente

entre el cuadrante bivariado y los diferentes niveles que alcanzó la sequía sufrida en el año 2011, esta última medida a partir de los valores que alcanzó el SPI sobre el territorio de Zacatecas.

Cuadro 3.7 Producción de frijol en municipios afectados por sequía severa pero poca superficie siniestrada respecto a la sembrada

Municipio	Superficie Sembrada (Ha)	Superficie Cosechada (Ha)	Superficie Cosechada (en %)	Porcentaje acumulado
Sombrerete	90,306.00	71,206.00	36%	36%
Río Grande	63,650.00	38,432.00	19%	55%
Miguel Auza	49,315.00	44,383.00	22%	77%
Fresnillo	44,200.00	8,050.00	4%	81%
Pinos	35,440.00	8,566.00	4%	85%
Juan Aldama	32,400.00	12,600.00	6%	92%
Total estatal	480,981	200,049.48	100%	

Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP, cierre de la producción agrícola por estado 2011

3.4 Relación espacial de SPI con Porcentaje de Superficie Siniestrada en relación con la Sembrada (PSSS) en el ciclo primavera-verano, 2011

En este último apartado se retoman los resultados cartográficos anteriores, es decir, las distribuciones espaciales del Índice estandarizado de Precipitación con un intervalo de nueve meses (SPI_9), así como el porcentaje de superficie siniestrada en relación a la sembrada (PSSS), con la finalidad de comprobar hasta qué punto se valida la hipótesis planteada de inicio, donde se asume que la relación espacial de intensidad de sequía en 2011 no fue proporcional al porcentaje de superficie siniestrada en la agricultura de temporal, en el ciclo primavera-verano, dentro del estado de Zacatecas. En razón a lo antes enunciado, los procesos a seguir se expresan a continuación:

- a) Delimitar las áreas dentro del estado a relacionar. En este apartado tiene la finalidad de identificar sólo las áreas clasificadas como de agricultura de temporal.
- b) Reclasificar los valores de SPI₉ y de PSSS para contar con un manejo más claro de la información.
- c) Buscar la relación espacial mediante la cual sea posible visualizar el nivel de asociación entre SPI₉ y el PSSS.
- d) Finalmente, con base en los resultados anteriores generar una matriz de frecuencias.

3.4.1 Delimitación de áreas con agricultura de temporal

Como ha sido posible percatarse, en Zacatecas el área dedicada a la agricultura de temporal anual es sustancial en la producción estatal ya que representa 79.35 % del total de las tierras destinadas a esta actividad económica. Su distribución está situada sobre una especie de “corredor” agrícola sobre la parte central de la entidad en sentido diagonal que transcurre desde el sureste hasta el noroeste, como se ha descrito en el apartado 2.3.2.

La finalidad de conocer la distribución espacial de estas zonas y hacerlas presentes en los mapas de SPI₉ y PSSS es mostrar las variables lo más cercanas a la realidad. El hecho de modelar los datos sin áreas de agricultura de temporal específicas genera confusión al suponerse que en la totalidad de un municipio existe ese tipo de agricultura.

En este sentido, los polígonos del área agrícola de temporal son los establecidos por el INEGI en el conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación Escala 1:250 000, Serie V (Conjunto Nacional), donde se incluyen las áreas agrícolas clasificadas de acuerdo con la forma de recibir el agua y por su ciclo agrícola. Los datos se generaron durante el periodo 2011-2013, con base en la información presentada en la Serie IV de Uso del Suelo y Vegetación y actualizada con imágenes del satélite LANDSAT del año 2011. Estas características de temporalidad y organización por ciclos agrícolas son representativas en este estudio ya que cuentan con las características necesarias para discernir las áreas agrícolas de temporal durante la sequía de 2011.

Los mapas que consideran SPI₉ y PSSS, concentrados únicamente sobre el área agrícola de temporal, se aprecian en la Figura 3.20. Éstas serán las superficies a partir de las cuales se buscó efectuar el proceso de relación espacial para visualizar si a mayor grado de sequía corresponderá mayor PSSS. Sin embargo, para que esto sea posible fue necesario homologar ambas variables en un formato *raster*, es decir, el espacio se va a dividir en celdas regulares donde cada una de ellas representa un valor único o nivel digital (ND). En el caso del SPI₉ esto ya se había establecido por las necesidades propias del proceso de interpolación, por lo tanto, sólo fue necesario transformar la cartografía referente al PSSS.

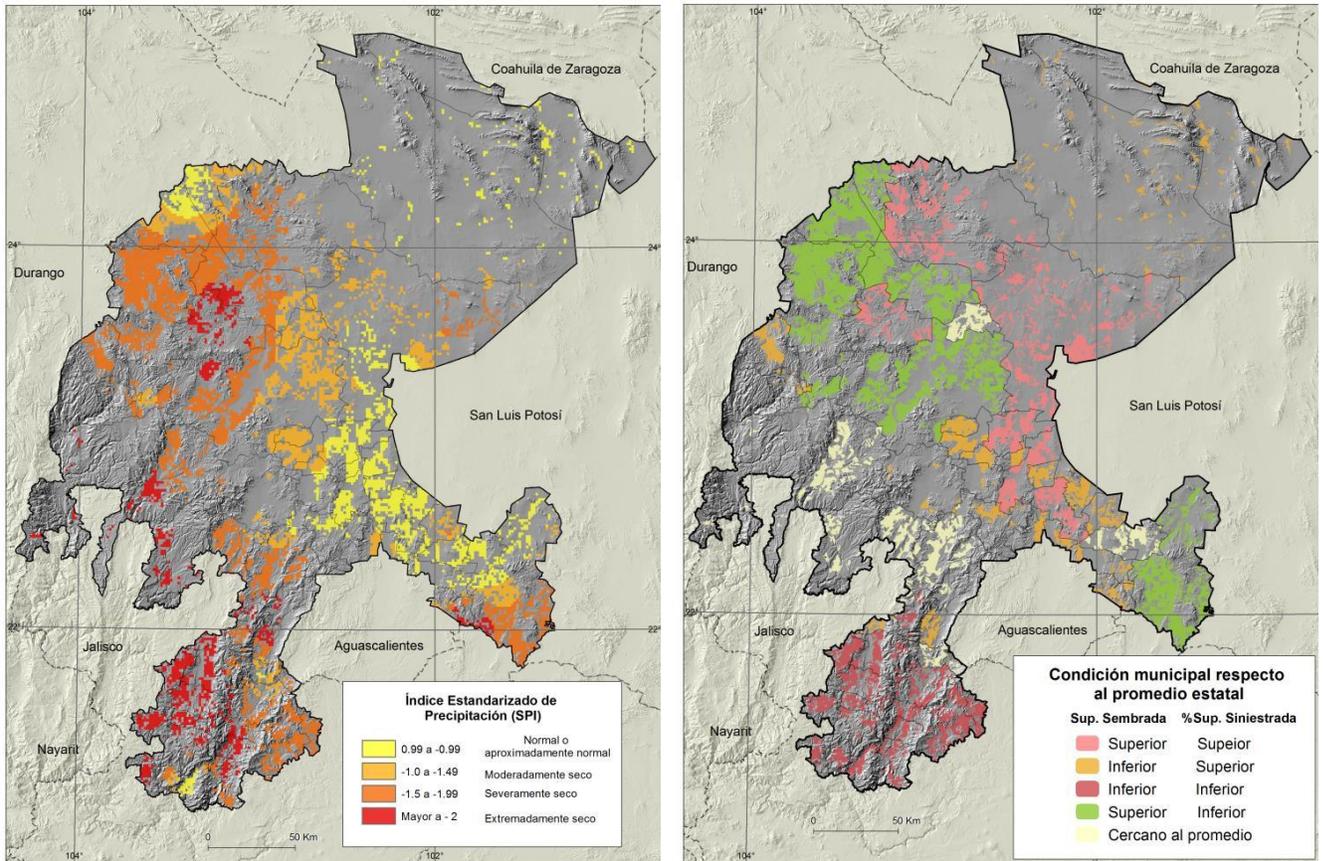


Figura 3.20 Mapas de SPI₉ y categorías de PSSS en áreas agrícolas de temporal

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI.

3.4.2 Reclasificación espacial de los valores de SPI y de Porcentaje de Superficie Siniestrada respecto a la Sembrada (PSSS)

La reclasificación espacial es el procedimiento donde los valores de una capa *raster* pueden simplificarse o sustituirse por unos nuevos, así es posible cambiar los valores de los ND para disminuir categorías existentes o clasificar a partir de necesidades posteriores. En este caso se aplica como un paso intermedio para seguir buscando posibles relaciones espaciales.

En los cuadros 3.8 y 3.9 se observa la clasificación de las variables a evaluar y su posterior reclasificación; en el caso del SPI₉, a los valores de las diferentes intensidades de sequía se les asignó una secuencia consecutiva del uno al cuatro, donde el cuatro denota la mayor intensidad de sequía; mientras que las nuevas categorías del PSSS van del 11 al 15 según su ubicación en los cuatro cuadrantes y los casos cercanos al promedio.

Cuadro 3.8 Reclasificación del valor SPI₉

SPI	Clasificación	Reclasificación (ND)
-0.99 a 0.99	Cercano a lo normal	1
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco	2
-1.5 a 1.99	Severamente seco	3
≤-2.0	Extremadamente seco	4

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI

Cuadro 3.9 Reclasificación de valor de PSSS

Clasificación		
Superficie sembrada	%Superficie siniestrada	Reclasificación (ND)
Superior	Superior	11
Inferior	Superior	12
Inferior	Inferior	13
Superior	Inferior	14
Cercano al promedio		15

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI

El proceso de reclasificación se efectuó mediante la herramienta *Arc Toolbox* en el apartado de *Spatial Analyst Tools >Reclass>Reclassify*. La ventana de trabajo que aparece muestra los viejos y nuevos valores (Figura 3.20). El tamaño de pixel con el que se guardaron las nuevas capas es de 1000 metros.

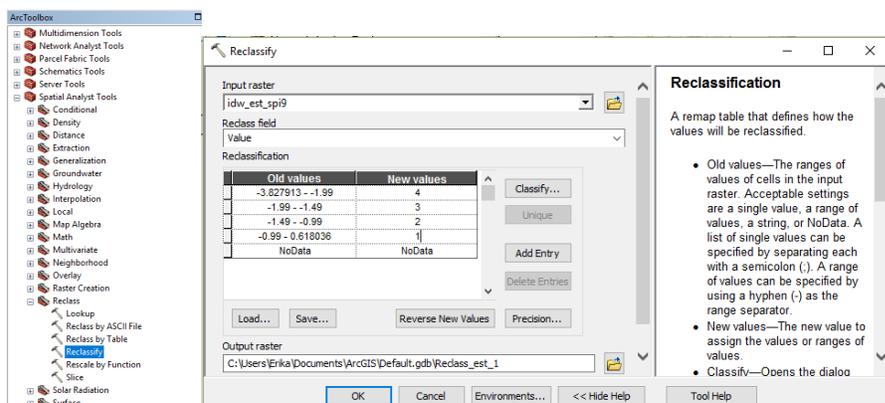


Figura 3.21 Simplificación de valor de SPI mediante la herramienta *Reclassify*

Fuente: Elaboración propia

3.4.3 Relación espacial del SPI₉ y PSSS

La información adjunta en las capas *raster* referentes al SPI₉ y el PSSS va a permitir la generación de una nueva capa que conjunte la relación de las dos variables. Esto se va a lograr mediante álgebra de mapas, recurso entendido como “[...] conjunto de procedimientos y métodos que permiten llevar a cabo análisis y extraer nuevos valores a partir de los contenidos en los *raster* de entrada” (Olaya, 2014:338).

El elemento principal del álgebra de mapas es cómo está relacionada la información espacial de los *raster* de entrada, es decir, qué "función" va a definir la capa resultante. Al respecto, Olaya (*op. cit.*: 441) señala cuatro tipos principales de funciones, estas son:

- Local. El valor en cada celda de la capa resultante es función únicamente de los valores en esa misma celda, generada a partir de las capas de partida.
- Focal. El valor en cada celda de la capa resultante es función del valor en dicha celda, además de las situadas en un entorno definido alrededor de la misma.
- Zonal o regional. El valor en cada celda de la capa resultante es función del valor de todas las celdas conectadas a ésta que presentan un mismo valor para una de las capas de entrada (pertenecen a la misma clase que ésta).
- Global. El valor resultante de la función es obtenido a partir de todas las celdas de la capa.

En el caso de este estudio se optó por relacionar el SPI₉ y PSSS mediante una función local, donde el valor de cada celda resultante es producto de la estimación de los valores de las celdas entrada, así la localización de los resultados está en función de lo que se encuentra únicamente en dicha ubicación, tal y como se ejemplifica en la Figura 3.22.

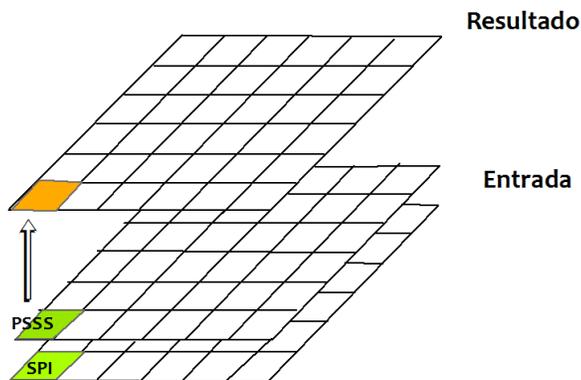


Figura 3.22 Función local aplicada a las capas *raster* de entrada SPI y PSSS

Fuente: Elaboración propia

Luego de haber establecido la función que se va a utilizar, es necesario precisar el operador aritmético (suma, resta, multiplicación, división) a emplear en la evaluación del conjunto de capas; en este caso se decidió trabajar con la multiplicación. Por lo tanto, la nueva capa *raster* estará conformada hasta por veinte valores, los cuales dependerán tanto del SPI₉ como del Porcentaje de Superficie Siniestrada respecto a la Sembrada (PSSS). Por ejemplo, el número once hace alusión a la celda donde se representa una sequía cercana a la normal (SPI=1) pero con alta superficie siniestrada (PSSS=11) respecto a la cosechada. El resultado de la multiplicación (SPI=1 x PSSS=11) le da el valor respectivo a la primera combinación, tal y como se puede observar en el Cuadro 3.10.

Cuadro 3.10 Posibles combinaciones y valores resultantes de la relación entre el SPI₉ y PSSS

SPI SP \ PSSS	11	12	13	14	15
1	11	12	13	14	15
2	22	24	26	28	30
3	33	36	39	42	45
4	44	48	52	56	60

Fuente: Elaboración propia

Los pasos mencionados se ejecutan de manera automatizada dentro de *ArcToolbox*, trabajando con la herramienta de *Spatial Analyst Tools >Map Algebra>Raster Calculator*. El nuevo archivo *raster* proporciona un resultado tanto tabular como cartográfico. Este último corresponderá a valores asociados con pixeles específicos, por lo cual es posible visualizar la ubicación espacial de cada uno de los valores finales, además de determinar la frecuencia de estos.

Bajo esta tesitura se consideró conveniente construir una matriz para facilitar la identificación del porcentaje de los valores resultantes dentro del territorio analizado, favoreciendo presentar todas las combinaciones posibles tal y como se observa en el Cuadro 3.11.

Cuadro 3.11 Resultados de la relación entre el SPI y PSSS en porcentaje respecto al total de superficie agrícola de temporal

Porcentaje de superficie agrícola estatal	PSSS	11	12	13	14	15
	SPI					
21.5	1	9.0%	6.7%	0.3%	3.9%	1.6%
24.6	2	6.4%	4.3%	0.4%	10.5%	3.0%
37.6	3	4.4%	1.9%	4.7%	25.4%	1.2%
16.3	4	5.4%	0.7%	6.4%	1.8%	2.0%
	% de superficie agrícola estatal	25.2	13.6	11.8	41.6	7.8

Fuente: Elaboración propia

3.4.3.1 Principales resultados referentes a la relación SPI₉ y PSSS

Los resultados obtenidos de la cuantificación efectuada pueden tener diversas lecturas, en especial al revisarlos desde una perspectiva de su distribución espacial. Con el fin de organizarlos de una manera consistente, se tomó como base la información resumida en el Cuadro 3.10, con la cual puede dimensionarse la cobertura territorial alcanzada por cada uno de los parámetros que sirvieron para determinar la intensidad de la sequía del año 2011 en Zacatecas, es decir, el SPI₉ y el Porcentaje de Superficie Siniestrada en relación con la Sembrada.

Para empezar, si se toma en cuenta al SPI₉ como eje de análisis, se podrá ver en el Cuadro 3.10 que los dos niveles más bajos de la sequía sufrida en 2011, calificadas como “normal” y “moderada” (con valores de SPI de 1 y 2, respectivamente), cubrieron 46 % de las zonas agrícolas estatales. Por otra parte, el otro par de categorías que contemplan las intensidades de mayor significancia, consideradas como “severa” y “extrema”, predominaron sobre el restante 54 % del área cultivable de esta entidad. De las cifras anteriores es viable aceptar que cada uno de esos grupos cubrió aproximadamente la mitad del estado. En este mismo sentido, es interesante destacar que la sequía de mayor intensidad (SPI = 4, Nivel = “extremo”) fue la que afectó en menor medida, al cubrir menos del 16.3 % de su superficie.

Esta última referencia parece un tanto contradictoria ante la gravedad histórica que alcanzó la sequía del año 2011. Sin embargo, es necesario recordar que el SPI se calcula en términos de la desviación estándar, por lo cual la intensidad resultante tendrá alta dependencia con la media aritmética del conjunto de datos de cada estación seleccionada. Por otra parte, en Zacatecas predominan las condiciones semiárido templado (BS1kw), razón por la cual la media estatal está obligadamente relacionada con niveles bajos de precipitación. Así, una zona con condiciones climáticas secas que al mismo tiempo sea afectada por una sequía tendrá efectos relativamente menores a los que se presentarían sobre otras áreas más húmedas, en la cual una sequía intensa tendría repercusiones negativas de mucha mayor relevancia.

En relación con lo anterior, la distribución de la sequía extrema se concentra en porciones agrícolas del suroeste que coincide con el clima: semicálido subhúmedo (A)C(w0) y los templados subhúmedos C(w0), C(w1), C(w2); donde se ubican municipios como de Atotolinga, Tepechitlan, Benito Juárez, Santa María de la Paz, al suroeste del estado; y en Monte Escondido y Valparaíso al oeste del mismo, donde se concentra la mayor precipitación total anual del estado, la cual va de los 600 a los 1000 mm, Figura 3.23.

Al enfocar ahora el análisis espacial en términos del Porcentaje de Superficie Siniestrada en relación con la Sembrada (PSSS), los resultados serán diferentes. En este caso, la primera condición en la cual se determinaron áreas donde se sembró un número de hectáreas superior al promedio estatal, que a la vez perdieron un alto porcentaje de estas, se observó en el 25.2 % de las zonas cultivadas. La situación opuesta a la anterior, donde se sembró una superficie inferior al promedio con pérdidas también relativamente menores, correspondió al 11.8 % del agro zacatecano.

La circunstancia de poca superficie sembrada y pérdidas grandes ocurrió en otro 13.6 % del estado. En contraste, 41.6 % de la tierra agrícola reportó alta superficie sembrada acompañada por pérdidas menores al promedio de manera independiente al grado de sequía registrado, ámbito coincidente con el planteamiento teórico de partida. A partir de este resultado se empieza a evidenciar que la hipótesis inicial no se cumplirá al 100 %, pero sería predominante en aproximadamente 40 % de los sembradíos, porción que puede calificarse como significativamente amplia.

Una última circunstancia se registró sobre el 7.8 % de superficie restante, en la cual tanto la extensión de sembradíos como el porcentaje de siniestralidad se ubicaron cercanos al promedio de cada uno de esos parámetros.

Es posible continuar analizando el espacio agrícola de Zacatecas desde otras perspectivas y combinaciones de categorías; sin embargo, será poca la aportación de ese esfuerzo en el

sentido de apoyar (o rechazar) la hipótesis de partida. Ante esa realidad se puede terminar esta etapa del estudio resaltando que el mayor porcentaje de área agrícola correspondió a la celda 42 con 25.4 % del total de la superficie agrícola de temporal. Este número referencia las áreas que fueron afectadas por una sequía severa y al mismo tiempo tuvieron poca superficie siniestrada respecto a la sembrada. Los municipios que se encuentran en esta categoría son: Miguel Auza, Río Grande, Sombrerete y Pinos (Figura 3.24). Dichos territorios también tienen en común el estar dentro de los primeros cinco lugares en superficie cosechada de frijol, durante el ciclo agrícola primavera-verano de 2011.

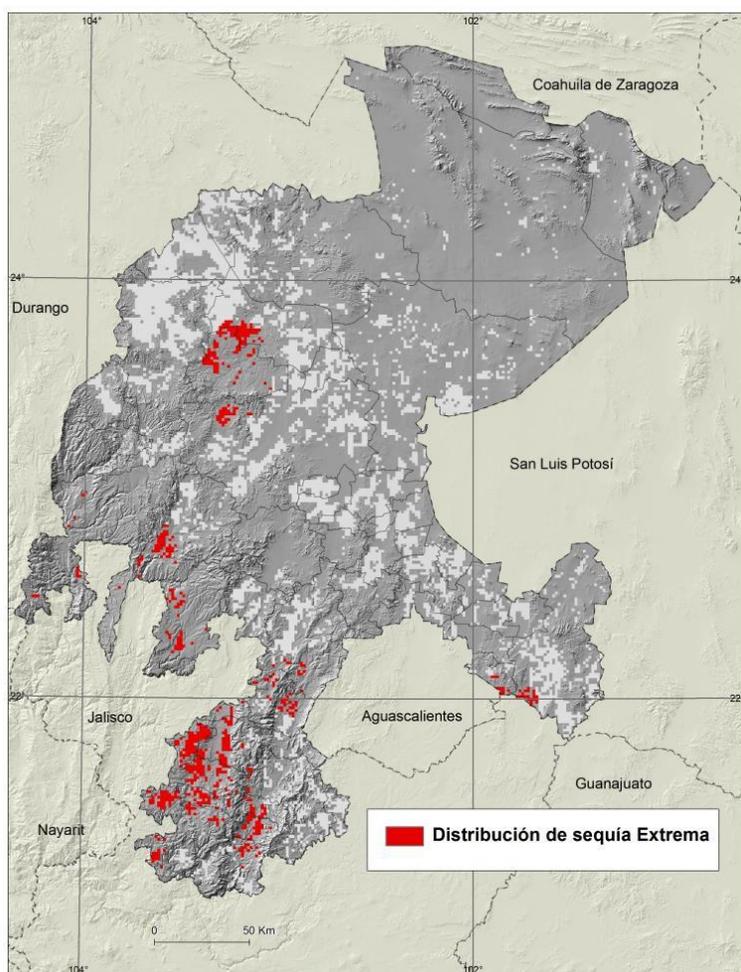


Figura 3.23 Distribución de sequía extrema

Fuente: Elaboración propia

Las combinaciones que representaron la menor superficie perdida correspondieron a los números 13 y 26 con 0.3 % y 0.4 %, respectivamente. El primer caso representa una sequía cercana a lo normal con poca superficie siniestrada, pero la superficie sembrada también fue escasa; el segundo caso es similar sólo que la sequía resultó moderada.

Los resultados demuestran que la totalidad de superficie agrícola de temporal, siniestrada durante el ciclo primavera-verano de 2011 en Zacatecas, no depende necesariamente del grado de sequía registrada. Si bien el grado de sequía predominante fue la severa (con 37.6 % del área total), el valor más representativo en relación con el Porcentaje de Superficie Siniestrada respecto a la Sembrada (PSSS) indica que las pérdidas fueron inferiores al promedio, a pesar de la intensidad del fenómeno.

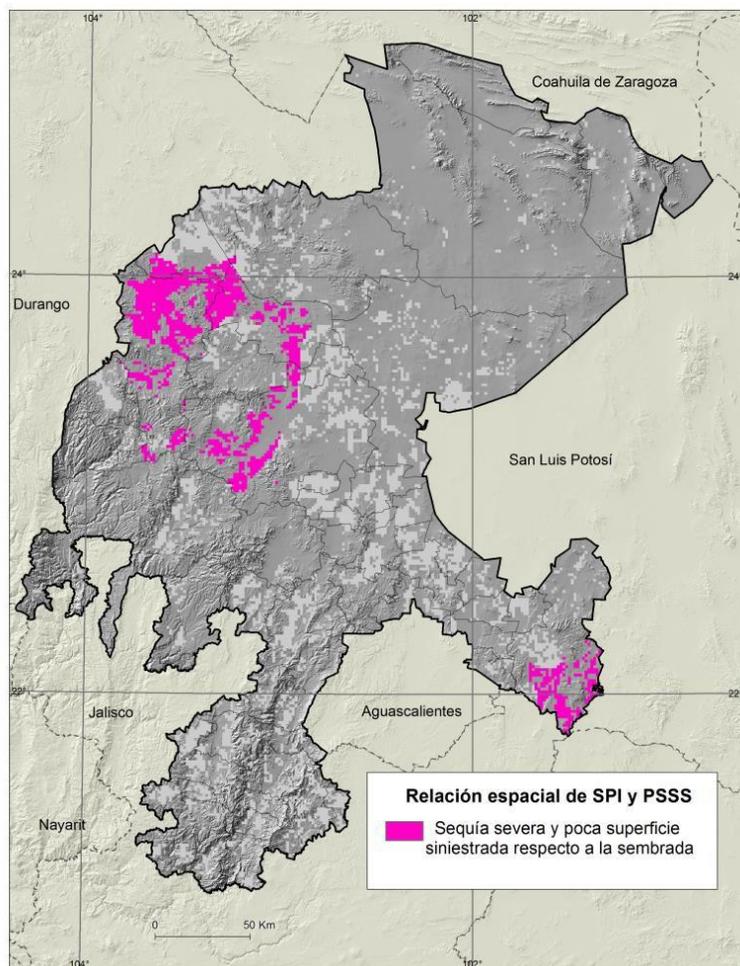


Figura 3.24 Relación espacial de SPI y PSSS: Sequía severa y poca superficie siniestrada respecto a la sembrada

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior, considerado desde el ámbito espacial, comprueba de manera mayoritaria la hipótesis que sustenta este trabajo: "Ante la sequía registrada en el estado de Zacatecas en 2011, la superficie siniestrada de temporal, en el ciclo primavera-verano, fue inferior a la esperada ante la magnitud que alcanzó el evento climático".

Conclusiones

Instituciones internacionales de importancia, como la FAO y la Organización Meteorológica Mundial, consideran que el fenómeno de sequía es la principal amenaza para las zonas agrícolas. Además, desde mediados del siglo veinte, la aridez y las zonas de sequía se han incrementado sustancialmente a nivel mundial. En México, a este evento se le relaciona en mayor medida con el fenómeno “El Niño”, ya que debido a su influencia es posible observar una significativa disminución de las precipitaciones en verano. La repercusión en el agro nacional es evidente a causa de que 73.1 % del total de superficie cosechada es de temporal y de ésta 75 % corresponde al ciclo agrícola primavera-verano. Por lo tanto, las áreas agrícolas dependientes del temporal se consideran las más susceptible a ser afectadas por déficit de lluvia.

El estado de Zacatecas destaca dentro de esta problemática debido a diversos factores. Primero, en su territorio predominan climas que van de semiáridos a muy áridos, donde la disponibilidad de agua (de cualquier origen) es limitada. Además, se caracteriza por un régimen pluvial errático, como lo demuestran los déficits de lluvia registrados en seis de los doce años transcurridos entre 2004 y 2015. Para tener una confirmación adicional, es posible mencionar que en ocho de esos doce años analizados se encontró entre los primeros cinco lugares (a nivel nacional) en porcentaje de superficie siniestrada.

Las circunstancias referidas antes tienen especial trascendencia al señalar que Zacatecas ha sido (y se mantiene) el principal productor de frijol en México. Se sabe que esta leguminosa es un alimento básico para la población y cualquier afectación a este cultivo, provocado por una sequía, tendrá repercusiones más allá de la escala local.

En lo que respecta a la sequía fue el fenómeno hidrometeorológico que más incidió dentro del territorio nacional dentro del periodo de 2005 a 2015. Dicho antecedente fundamenta la realización de estudios especializados sobre sequía y su relación con la problemática en el agro nacional. Se eligió como marco temporal el año 2011 por registrar una de las sequías más severas en más de medio siglo, al grado de extenderse hasta los primeros meses de 2012 y causando pérdidas agrícolas calculadas en 150 mil millones de pesos en todo el país.

Con estos antecedentes, el desarrollo del trabajo se orientó de manera central a determinar el grado de cumplimiento del siguiente principio:

- La relación espacial de intensidad de sequía en 2011 no fue proporcional al porcentaje de superficie siniestrada en la agricultura de temporal, durante el ciclo primavera-verano, en el territorio estatal de Zacatecas.

En el contexto de la sequía se revisaron diversos conceptos, decidiendo basar este trabajo en la sequía meteorológica donde el evento se define debido a la disminución de valores en la precipitación promedio en un periodo mínimo de 30 años, en este caso se contemplaron 32 años (1980 a 2012).

La forma en la que ha sido posible representar una sequía y sus diferentes intensidades se calcula a partir de índices numéricos, de los cuales se seleccionó el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) al ofrecer ventajas importantes, tales como: la existencia de un código o programa de fácil acceso y de libre utilización para calcularlo; además de sólo requerir datos de precipitación mensual.

En lo que respecta a Zacatecas, la agricultura de temporal comprende 88 % de la superficie agrícola total, mientras que el ciclo primavera-verano aporta 90 % de las cosechas, ante lo cual se decidió orientar los análisis hacia esos dos parámetros (agricultura de temporal y ciclo agrícola primavera-verano).

Para abordar la parte metodológica del análisis se revisaron tres protocolos de investigación aplicados a determinar relaciones espaciales entre dos parámetros. Después de ponderar ventajas y desventajas, se tomó como referencia el trabajo de Moreno (2013). Los resultados obtenidos aquí validan esa elección, al representar un apoyo práctico para el desarrollo de los diversos análisis aplicados.

Con esa base se estructuró la propuesta metodológica para desarrollar esta investigación, fundamentada en el análisis y búsqueda de relaciones espaciales entre dos elementos principales: Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y porcentaje de superficie siniestrada; en particular para cultivos de temporal dentro del ciclo primavera-verano del año 2011 en el estado de Zacatecas.

Al integrar las etapas de análisis se concretó una metodología propia, con la cual se perfilaron líneas de trabajo, las cuales se reforzaron de manera sustancial al procesar la cartografía mediante el programa ArcGis (v. 10.2.2), permitiendo ensayar distintos escenarios espaciales hasta determinar el mejor modelo en términos de alcanzar los objetivos de este estudio.

Para demostrar la tesis de partida se requería conocer el entorno físico del estado de Zacatecas, con el fin de dimensionar la frontera agrícola estatal. El primer elemento a

estudiar fue el relieve, con el cual fue posible identificar una serie de planicies de tamaño reducido ubicadas al sur y otras más amplias situadas sobre la parte central, también con pendiente suave, representativas de las mejores condiciones para desarrollar cultivos agrícolas. Más adelante se confirmó la precisión de esta primera aproximación, al compararla con la Carta de Uso de Suelo de INEGI.

Por otro lado, la información cartográfica de Climas en Zacatecas demostró que 83 % del estado presenta condiciones que van de semiáridas (BS1) a muy áridas (BW), circunstancia relevante al ser indicativa de limitaciones importantes para desarrollar la actividad agrícola. Estas limitaciones se confirmaron con los datos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) a partir de los cuales se calculó una frontera de superficie cultivable de hasta 1.2 millones de hectáreas, cifra equivalente a 19 % de las 7.5 millones de hectáreas que abarca el territorio estatal.

Los efectos negativos del predominio de climas áridos y semiáridos se hicieron más evidente al revisar otros dos elementos físicos sustanciales: primero, los limitados volúmenes de precipitación pluvial (un promedio de 534 mm) que recibe anualmente esta entidad federativa y, segundo, la notable carencia de ríos permanentes. Sólo destacan los ríos Aguanaval y el Río Grande, que riegan el Noroeste; al Sur el Juchipila y el Tlatenago.

Ante el predominio de climas áridos, ausencia de lluvias abundantes y carencia de corrientes de agua permanentes, se puede calificar de lógica la existencia de infraestructura hidráulica a partir de siete grandes presas, todas cercanas a las corrientes superficiales de mayor importancia. Sin embargo, también fue notable encontrar que la principal fuente de abastecimiento son mantos subterráneos, de donde se abastecen 73 % de las necesidades de agua en el estado.

En lo referente al tipo de suelo predomina el Xerosol con 38.87 %, su productividad agrícola se determina en razón a una adecuada disponibilidad de agua, el mismo escenario ocurre con las superficies cubiertas por Castañosem, Regosol, Litosol y Feozem, las cuales en conjunto suman 89.15 % del total del territorio zacatecano.

A partir de cálculos propios se determinó un promedio de 1.2 millones de hectáreas sembradas por año. Con esta superficie el estado se ubica entre los ocho primeros productores agrícolas del país a pesar de las circunstancias físicas. Sin embargo, precisamente por la falta de agua también se determinó la posibilidad de perder la tercera parte de cultivos por causas de siniestros (como ocurrió en 2005, 2010 y 2011).

Al revisar las estadísticas respectivas, entre los cinco cultivos que ocuparon en conjunto 90 % del área agrícola, se identificaron tres (frijol, avena y maíz forrajeros) que sumaron

72 % del área total con baja demanda de agua y cuidados mínimos, propios para enfrentar la combinación de suelos y climas locales. Por sí solo, el frijol concentró la mitad de superficie cultivada. En contraste, el chile verde ocupa áreas de tamaño secundario, pero con alto rendimiento, al estar dotadas de regadío para asegurar su rentabilidad.

Los cinco municipios con una mayor superficie cosechada son: Sombrerete, Fresnillo, Pinos, Río Grande y Miguel Auza, estos aportan 45 % de la superficie cosechada. Como era de esperarse debido al relieve local, todos ellos se ubican en zonas relativamente planas, confirmando la mejor vocación de suelos con poca pendiente. El único caso significativo de excepción fue Pinos, situado en el extremo oriental (colindando con San Luis Potosí); sin embargo, también cuenta con una amplia superficie cubierta por llanuras.

Ya se mencionó que 88 % de la superficie agrícola depende del temporal; pero la mitad de la infraestructura de riego se concentró en cinco municipios: Fresnillo, Villa de Cos, Guadalupe, Loreto y Calera, dichas entidades se encuentran dispersas sobre el territorio estatal.

A partir de la metodología estructurada para esta investigación, el siguiente paso fue determinar el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) a nueve meses (marzo-noviembre) pues cubre todo el ciclo agrícola primavera-verano. El índice es producto del registro de precipitación de 48 estaciones climatológicas operadas por la CONAGUA. Los registros se consideraron de 1980 a 2012, es decir, 32 años de datos. A partir de los valores correspondientes al SPI se identificaron cuatro magnitudes de sequía: 1) cercana a la normal, 2) moderada, 3) severa y 4) extrema.

Sobre esos cuatro grupos de clasificación se llevó a cabo una interpolación, mediante el SIG la técnica empleada fue la de ponderación por distancias (IDW, por sus siglas en inglés); tomando como referentes una zona de influencia circular con un mínimo de dos vecinos y máximo de cinco, la manera en la que el peso disminuye es en relación con la distancia la cual está dada por $p=2$.

El resultado de este procedimiento identificó al norte y este de Zacatecas las áreas con menor intensidad de sequía o aquellas cercanas a la normal; conviene recordar que al norte predominan los climas árido semicálido (BSohw), árido templado (BSokw y BSokx') y muy árido semicálido (BWhw); mientras al este también encontramos una porción de árido templado (BSokw), razón por la cual en el periodo de estudio su baja precipitación respecto al promedio estatal puede considerarse menos "atípico" de lo que podría suponerse. Municipios como: General Francisco R. Murguía, Melchor Ocampo, Mazapil, Concepción del Oro, Ojo Caliente, Villa Hidalgo, entre otros, son representativos de esta agrupación.

En contraste, al suroeste la sequía tiende a intensificarse hasta llegar a su condición de extrema. Es visible que las áreas de mayor afectación corresponden en gran medida a las porciones del territorio caracterizadas con climas semicálidos subhúmedos (A)C(w₁) y (A)C(w₀), cálidos subhúmedos (Aw₁ y Aw₀) y a los templados subhúmedos C(w₀), C(w₁), C(w₂).

La siguiente etapa de análisis contempló la técnica del *kriging*, para la cual se optó por el tipo ordinario. A partir de los datos de precipitación pertenecientes a las 48 estaciones se definieron categorías muy similares, en lo general, a las del IDW, resultando también una menor intensidad de sequía en el norte y al este, mientras que el suroeste resaltó como el territorio más afectado por la condición de extremadamente seco.

Después de conocer los resultados espaciales de los métodos de interpolación IDW y *kriging*, la metodología demanda contrastar ambos métodos mediante una validación cruzada (*crossvalidation*). El resultado del proceso anterior determinó que el mejor modelo de interpolación del SPI₉ fue el IDW. Adicionalmente, su representación espacial no contó con irregularidades significativas.

Para el análisis de la superficie agrícola siniestrada a escala municipal se tomaron en cuenta las 932 mil hectáreas sembradas, en tierras de temporal, para el ciclo primavera-verano de 2011. Una vez más, fueron suficientes sólo seis de los 58 municipios zacatecanos para conjuntar poco más de la mitad de la superficie sembrada de todo el estado. En términos generales esa jerarquía sigue el patrón de sembradíos correspondiente a 2014, año considerado “normal” y sin evidencia alguna de sequía. En lo que corresponde a siniestralidad del periodo de estudio, se evidenció lo difícil de ese año para la agricultura local al perderse un promedio de 63 % del total sembrado en terrenos de temporal del ciclo primavera-verano.

Sin embargo, una revisión a mayor detalle permitió establecer otras conclusiones complementarias. Por ejemplo, los mayores productores (en términos de la superficie sembrada) no necesariamente sufrieron las mayores pérdidas. Por ejemplo, el municipio principal (Sombrerete) sólo reportó un 20 % de superficie siniestrada. Así, de los seis mayores productores, únicamente General Francisco R. Murguía reportó la pérdida total de cosechas. En contraste, se identificaron 29 municipios que sufrieron la mayor afectación por la sequía del año 2011, sumando poco más de la tercera parte de la superficie sembrada y acumulando la mitad de las pérdidas. Por lo tanto y a pesar de enfrentar una de las sequías más significativas de la historia reciente, los niveles de pérdida más sustanciales se limitaron a ese tercio del territorio agrícola de Zacatecas.

Lo anterior puede resumirse de la siguiente forma: la tercera parte de la superficie agrícola estatal sufrió pérdidas sustanciales; otro tercio enfrentó siniestralidad media y el tercio restante presentó daños de menor cuantía. Desde el punto de vista espacial, el parámetro de superficie siniestrada se apegó a esa triple agrupación.

Lo más destacable de los patrones de distribución territorial fue el hecho de que cada categoría perfiló regiones definidas y de notable homogeneidad. En la primera de ellas (menor nivel de pérdidas) se encontraron los productores agrícolas localizados sobre el poniente de Zacatecas. Otra región en la misma circunstancia se formó con otros trece municipios situados en el extremo sur.

En la segunda categoría y con pérdidas más cuantiosas se encontraron doce casos, distribuidos en tres áreas también específicas, sobre el extremo oriental del estado (dos municipios); otra en el sur (tres casos) y la tercera formando una especie de corredor desde el extremo suroeste hasta la porción central del estado (seis unidades municipales). El único caso aislado de las regiones referidas fue Juan Aldama, el cual por muy poco quedó fuera de este tercer grupo.

El tercer conjunto de municipios, el más numeroso de todos (29 casos), ocupó buena parte de la mitad oriental de Zacatecas, exceptuando el extremo sur. Prácticamente la mitad de esa extensa región la ocuparon algunos de los municipios de mayor tamaño, en especial los situados al norte, todos ellos con baja capacidad agrícola. Además, en esta categoría se encontraron tres municipios que rompieron la continuidad regional, situados dos al poniente y uno al sur (Momax), sin ser claras las razones de esta ruptura de continuidad geográfica.

A pesar de que no se contemplaba al plantear la metodología de análisis, fue necesario aplicar un análisis bivariado para comparar la superficie sembrada con el porcentaje de superficie siniestrada. Con este recurso se permitió cuantificar tanto la extensión sembrada como el porcentaje perdido de la misma. El coeficiente de correlación de Pearson resultó bajo e inverso ($r = -0.130$), dando lugar a que los municipios se distribuyeran por todos los cuatro cuadrantes.

Al representar en cartografía adecuada las condiciones “lógicas” (mayor superficie sembrada y mayor proporción de siniestralidad, cuadrantes I y III) se encontraron seis casos en el primero, formando una región desde el sur hasta el noroeste de la entidad. Los municipios ubicados en el tercer cuadrante (con 15 casos) perfilaron una regionalización muy clara al sur del estado.

Sin embargo, los 37 municipios restantes se alejaron de esa “lógica”. Esa elevada cantidad de excepciones obliga a aceptar que se entrecruzan factores, ya sean estos naturales, institucionales o privados, que favorecen la presencia de circunstancias contrastantes en el agro de Zacatecas. Por ejemplo, el cuarto cuadrante ubicó los seis municipios con mayor superficie sembrada y menor proporción de superficie siniestrada, casi todos (excepto Pinos) formando una región en el poniente de Zacatecas. Es importante señalar la particularidad de que integró a los mayores productores de frijol del estado, al menos durante el ciclo agrícola primavera-verano de 2011. En conjunto los seis municipios referidos concentraron el 92 % de la superficie cosechada de esta leguminosa.

La última etapa del presente estudio se centró en buscar la posible relación existente entre el cálculo bivariado, "Porcentaje de superficie siniestrada respecto a la sembrada" (PSSS) y los diferentes niveles que alcanzó la sequía sufrida en el año 2011 para cada municipio. Esta última medida partió de los valores que alcanzó el SPI₉ sobre el territorio de Zacatecas, todo enfocado a validar la hipótesis de inicio, donde se asume que la relación espacial de intensidad de sequía en 2011 no fue proporcional al porcentaje de superficie siniestrada en la agricultura de temporal, en el ciclo primavera-verano, dentro del estado de Zacatecas.

Para ese fin fueron de utilidad significativa los polígonos del área agrícola de temporal del INEGI, del conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación Escala 1:250 000, Serie V (Conjunto Nacional). Este material digital permitió identificar las zonas correspondientes al área agrícola de temporal, con las cuales se efectuó el proceso de relación espacial aplicando los principios del álgebra de mapas. Quedó demostrado el potencial de un SIG para relacionar el SPI₉ y el Porcentaje de Superficie Siniestrada respecto a la sembrada (PSSS) mediante una función local capaz de asignar valores a las celdas resultantes.

En un primer ejercicio, tomando en cuenta al SPI₉ como eje de análisis, se encontró que los niveles más bajos de la sequía sufrida en 2011, calificados como “normal” y “moderada”, cubrieron 46 % de las zonas agrícolas estatales. Por otra parte, el par de categorías restantes contemplan las intensidades de mayor significancia; consideradas como “severa” y “extrema”, predominaron sobre el 54 % restante del área cultivable. Por lo tanto, cada uno de esos grupos cubrió aproximadamente la mitad del estado. En particular, se debe enfatizar que la sequía de mayor intensidad (nivel= “extremo”) afectó menos del 16.3 % de su territorio.

Esta última referencia parece un tanto contradictoria ante la gravedad histórica que alcanzó la sequía del año 2011; pero en Zacatecas predominan las condiciones de un clima semiárido templado (BS1kw), razón por la cual la media estatal refleja obligadamente

niveles bajos de precipitación. Por ende, una zona con clima seco afectada por una sequía intensa sufrirá daños relativamente menores a los que tendría de presentarse sobre un área húmeda. Con este antecedente puede entenderse mejor como la distribución de la sequía extrema se concentró en zonas agrícolas del suroeste y oeste coincidentes con climas semicálido subhúmedo (A)C(w0) y templados subhúmedos C(w₀), C(w₁), C(w₂), donde se registra la mayor precipitación del estado.

El segundo ejercicio realizado fue enfocar el análisis espacial a la relación entre el Porcentaje de Superficie Siniestrada en relación con la Sembrada (PSSS). Los resultados obtenidos fueron diferentes a los del análisis anterior. La primera condición (áreas con número de hectáreas sembradas superior al promedio estatal), que a la vez perdieron un alto porcentaje de estas, se observó en el 25.2 % de las zonas cultivadas. La situación opuesta a la anterior, donde se sembró una superficie inferior al promedio con pérdidas también relativamente menores, correspondió al 11.8 % del agro zacatecano.

La condición de poca superficie sembrada y pérdidas grandes ocurrió en otro 13.6 % del estado. En contraste, 41.6 % de la tierra agrícola reportó alta superficie sembrada acompañada por pérdidas menores al promedio de manera independiente al grado de sequía registrado, este último coincidente con el planteamiento teórico de partida. A partir de este resultado se hizo evidente que la hipótesis inicial no se cumpliría al 100 %, quedando limitada al 40 % de los sembradíos, porción que puede calificarse como significativamente amplia.

Una última circunstancia se registró sobre el 7.8 % de superficie restante, en la cual tanto la extensión de sembradíos como el porcentaje de siniestralidad se ubicaron cercanos al promedio de cada uno de esos parámetros.

Los resultados obtenidos demostraron que la totalidad de superficie agrícola de temporal, siniestrada durante el ciclo primavera-verano de 2011 en Zacatecas, no depende necesariamente del grado de sequía registrada. Si bien el grado de sequía predominante fue la severa (con 37.6 % del área total), el valor más representativo en relación con el Porcentaje de Superficie Siniestrada respecto a la Sembrada (PSSS) indica que las pérdidas fueron inferiores al promedio, a pesar de la intensidad del fenómeno.

Lo anterior, considerado desde el ámbito espacial, comprueba de manera mayoritaria la hipótesis que sustenta este trabajo: "Ante la sequía registrada en el estado de Zacatecas en 2011, la superficie siniestrada de temporal, en el ciclo primavera-verano, fue inferior a la esperada ante la magnitud que alcanzó el evento climático".

Por lo tanto, la confirmación parcial del supuesto hipotético de partida confirma la importancia que alcanzan las medidas de prevención, tanto estructurales como no estructurales. Dentro de las primeras destaca la infraestructura que ayuda a controlar, almacenar, extraer y distribuir el agua almacenada de la lluvia. La mayor disponibilidad de líquido se registró en los municipios de Miguel Auza, Río Grande y Sombrerete, donde se ubican diez presas, aparte de diversos bordos de menor importancia; adicionalmente el Río Agua Naval atraviesa esa porción de territorio favoreciendo el cultivo. En el mismo sentido, pero en el sureste del estado, el municipio de Pinos alberga otras diez presas. Se explica así la menor pérdida de cultivos durante la gran sequía de 2011.

Otra de las conclusiones de mayor relevancia puede parecer muy obvia, pero no se había contemplado al inicio del estudio. Sin embargo, luego de la práctica de campo (hecho en las zonas agrícolas de los municipios Fresnillo, Río Grande y Miguel Auza) y la entrevista con el señor José Ceballos Delgado, Presidente de la Unión de Ejidos del municipio de Río Grande, fueron evidentes las segundas medidas o acciones secundarias que se adoptan de manera preventiva para disminuir efectos negativos. Se considera evidente que los productores han seleccionado adecuadamente al frijol como su cultivo preponderante. Basados en su experiencia han encontrado en esta planta un alto potencial de adaptación a condiciones de sequía. De acuerdo con opiniones de los productores locales, es suficiente un poco de lluvia cada quince días para que sea posible obtener una buena cosecha. De estar ausente la precipitación, todavía los productores pueden recurrir al líquido almacenado en presas y bordos.

La consistencia encontrada en los resultados obtenidos mediante la aplicación de diversas utilerías automatizadas permitió validar hasta donde fue posible la metodología empleada al punto que logró demostrarse el supuesto hipotético. Se trata de una evidencia de cómo el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se consolida como una herramienta capaz de trabajar no sólo aspectos ambientales; también permite inducir tanto susceptibilidades como fortalezas de los actores sociales. No obstante, queda la experiencia de que la información a emplear debe pasar por controles de calidad y valores “testigo”, aparte de la necesidad imperiosa de confirmar los resultados mediante el trabajo de campo.

De igual manera, queda la propuesta metodológica estructurada para este trabajo, la cual demostró la capacidad necesaria para la realización de análisis similares al efectuado aquí. Se trata de una serie de procedimientos, ya ordenados de manera secuencial, que permite realizar los diagnósticos requeridos para demostrar el cumplimiento (total o parcial) de supuestos hipotéticos como el que orientó la presente investigación.

Luego de efectuar este trabajo se recomienda profundizar en las medidas adaptativas y de prevención que toman los agricultores de estas zonas, tan altamente productivas y, por ende, importantes tanto en el suministro de un producto básico, así como en la estructura de sus organizaciones. Estas sugerencias darán seguimiento al presente estudio y revelarán si las nuevas acciones implementadas ofrecen una garantía razonable de que lograrán disminuir los impactos de la sequía, necesidad extrema ante la recurrencia de este tipo de eventos.

Bibliografía

- Abad, O. (2014). *Estimación de precipitación espacial mediante correlación con variables secundarias y la ayuda de tecnologías de información geográfica*. Proyecto de graduación previo a la obtención del Grado de Magister en Geomántica. Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Ecuador.
- Aguilera, N. (1989). *Tratado de edafología de México*. UNAM, Facultad de Ciencias. Ciudad Universitaria.
- Altieri, M, Nicholls, C. (2013). "Agroecológica y resiliencia al cambio climático: principios y consideraciones metodológicas". *Agroecológica*. 8(1), 7-20.
- Altieri, M., Nicholls, C. (2008). "Los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas y de agricultores tradicionales y sus respuestas adaptativas". *Agroecología*. (3), 7-23.
- Álvarez, A. (2005). Sobre la evaluación de riesgo de desastres naturales y vulnerabilidad de la comunidad utilizando sistemas de información geográficos. Consulta: 21 de noviembre de 2016 [<https://academic.uprm.edu/laccei/index.php/RIDNAIC/article/view/95/94>].
- Arsentiev, A., Hathaway, D., y Lessard, R. (2013). "El soplido del viento solar: Las manchas solares, los ciclos solares y la vida en la Tierra". *Oilfield Review*. (3), 25.
- Balleza, J., Villaseñor, J. (2002). "La familia *Asteraceae* en el estado de Zacatecas (México)". *Acta Botánica Mexicana*, julio-sin mes, 5-69.
- Banco Mundial (noviembre 18 de 2013). Los daños causados por fenómenos meteorológicos extremos aumentan a medida que el clima se torna más cálido. Consulta: 23 de Octubre de 2016 [<http://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2013/11/18/damages-extreme-weather-mount-climate-warms>].
- Banco Mundial-Estado de Zacatecas. (2012). Análisis del uso y manejo de los recursos hídricos en el Estado de Zacatecas. Consulta: 7 de Junio de 2016 [<http://documents.worldbank.org/curated/en/215661468276380592/pdf/684220WPOP10580S0HIDRICOS0ZACATECAS.pdf>].
- 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*. Trabajo para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados (DEA). Programa de doctorado de Astronomía y Meteorología (Bienio 2002-2004).
- Calvo, F. (1984). "La geografía de los riesgos". Cuadernos críticos de Geografía Humana. Número 54. Consulta: 25 de marzo de 2014 [<http://www.ub.edu/geocrit/geo54.htm>].

- Cañada, M., Moreno, A., y González, H. (2014). "Modelado de la calidad del aire urbano un experimento metodológico con técnicas de interpolación espacial". *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*. (65), 317-342.
- Cañada, R. (2008). Técnicas de interpolación geoestadísticas: Kriging ordinario. En Moreno, A. (Coord.): *Sistemas y análisis de la información geográfica*. México, Alfaomega, 834-863.
- Cañada, R. (2008). Técnicas de interpolación espacial determinísticas y exactas: media ponderada por el inverso de la distancia y funciones de base radia. En Moreno, A. (Coord.): *Sistemas y análisis de la información geográfica*. México, Alfaomega, 792-819.
- Cardona, O. (2001). *Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos*. Tesis que para obtener el grado de Doctor en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- CENAPRED-SEGOB (2017). *Atlas Nacional de Riesgos*. Consulta: 2 de junio de 2017 [<http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/>].
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) (2015). Human cost of weather related disasters 1995-2015. Consulta: 20 de Octubre de 2016 [http://www.unisdr.org/files/46796_cop21weatherdisastersreport2015.pdf].
- Centro Nacional de Desastres (CENAPRED) (2002). *Seqüias*. Fascículo N. 14. México.
- Climate Prediction Center (CPC) (2015). Preguntas frecuentes sobre El niño y La Niña. Consulta: 28 de Octubre de 2015 [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensofaq.shtml#NINO].
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (2014). Estudio Previo Justificativo para el establecimiento del área natural protegida de competencia de la Federación con la categoría de Reserva de la Biosfera "Desierto Semiárido de Zacatecas", ubicada en el estado de Zacatecas. Consulta 20 de diciembre de 2016 [http://www.conanp.gob.mx/datos_abiertos/DGCD/8.pdf].
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (2017). Portal de Geoinformación. Consulta: 24 de septiembre de 2017 [<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>].
- Comisión Nacional de Seguros y Fianzas (CNSF) (s. f.). Anexo 5.6.1. Consulta: 10 de septiembre de 2016 [www.cnsf.gob.mx/Normativa/CUSF_WORD/.../ANEXO%205.6.1-a.docx].
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (s.f). Clima en México. Consulta: 31 de enero de 2017 [http://smn1.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=103&Itemid=80].

- CONAGUA (2014). Estadísticas del agua en México. Consultado, 27 de enero de 2015 [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf].
- CONAGUA (2014). Política Pública Nacional para la Sequía Documento rector. Consultado: 17 de noviembre de 2016 [http://www.pronacose.gob.mx/pronacose14/Contenido/Documentos/Documento%20M arco.pdf].
- CONAGUA-SMN (2014). Índice de Precipitación Estandarizado. Consultado: 7 de noviembre de 2014 [http://smn.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=257&Item id=74].
- CONAGUA-SMN (s. f.). Comisión Nacional del Agua; Servicio Meteorológico Nacional. Clima en México. Consulta: 31 de enero de 2017 [http://smn1.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=103&Ite mid=80].
- Conde, C., Ferrer, R., Araujo, R. (2004). El Niño en el sector agrícola. En Magaña, V. *Los impactos del Niño en México*. (pp. 103-136). Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación. México.
- Corvera, C., Mojarro, F., Velasco, I., González, T. (2006). Programa SIG GESEZA y el SPI, para caracterizar la sequía y su relación siniestros de cultivo de temporal e incendios forestales. En *Sequía: Vulnerabilidad, impacto y tecnología para afrontar en el Norte centro de México*. Compiladores: G, Ángel., Salinos, H. Rumayor, A. (pp. 65-67) Instituto Nacional de investigaciones forestales, agrícolas y pecuarias.
- Coy, M. (2010). "Los estudios del riesgo y de la vulnerabilidad desde la geografía humana: Su relevancia para América latina". *Población y sociedad*, 17(1), 9-28.
- Crespo, G., Arteaga, R., Quevedo, A., Rivera, R. (2007). "Comportamiento espacio temporal de la sequía en el estado de Durango, México". *Terra Latinoamericana*, 25, sin mes, 383-392.
- Dai, A. (2011). "Drought under global warming: a review". *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1), 45-65.
- Delgadillo, J. Agilar, O. Rodríguez, D. (2004). Los aspectos económicos y sociales de El Niño Impactos económicos de El Niño en México. En Magaña, V. *Los impactos del Niño en México*. (181-211). Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación. México.
- Diario Oficial de la Federación de los Estados Unidos Mexicanos, 25 de enero de 2012.
- Diario Oficial de la Federación de los Estados Unidos Mexicanos, 22 de noviembre de 2012.
- Diario Oficial de la Federación de los Estados Unidos Mexicanos, 26 de julio de 2012.

- Díaz, M. Díaz, C. (2002). "El análisis de la vulnerabilidad en la cartografía de riesgos tecnológicos. Algunas cuestiones conceptuales y metodológicas". *Serie Geográfica*. (10), 27-41.
- Edwards, D.C. y Mckee, T. B. (1997). "Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales". *Climatology Report*. Colorado State University. Department of Atmospheric Science (97-2). pp. 155.
- ESRI (2010). ArcGIS Geostatistical Analyst Tutorial. Consulta: 27 de noviembre de 2016 [<http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/pdf/geostatistical-analyst-tutorial.pdf>].
- Estado de Zacatecas. Programa hídrico estatal, visión 2030 Zacatecas. (s. f) . Consulta: 7 de enero de 2015 [<http://upla.zacatecas.gob.mx/wpcontent/uploads/2014/03/Programa%20H%C3%ADdrico%20Estatal%20visi%C3%B3n%202030.pdf>].
- FAO (26 de noviembre de 2015). El aumento de los desastres relacionados con el cambio climático es una amenaza creciente para la seguridad alimentaria. [En línea]. FAO, Medios, Noticias. Consulta: 17 de febrero de 2016 [<http://www.fao.org/news/story/es/item/346380/icode/>].
- FAO-SAGARPA (2014). La gestión de riesgos climáticos catastróficos para el sector Agropecuario en México: Caso del componente para la atención a desastres naturales para el sector Agropecuario. Consulta: 18 de febrero de 2016 [<https://coin.fao.org/coinstatic/cms/media/20/13954329605800/cadena.pdf>].
- Flores, S. (2 de agosto de 2013). Modelo predice sequías e inundaciones a partir de manchas solares. [En línea]. Ciencia UNAM. Consulta: 15 de Noviembre de 2015 [http://ciencia.unam.mx/leer/239/Modelo_predice_sequias_e_inundaciones_a_partir_de_manchas_solares#manchas_solares,inundaciones_y_sequias].
- Florescano, E. (2000). *Breve historia de la sequía en México*. CONACULTA. México.
- García de León, A. (2012). "Causalidad entre calidad educativa y condiciones de vivienda en Michoacán: Una propuesta metodológica". Libro electrónico; AMECIDER 2012.
- Giménez, F., Monsoriu-Serra, J. y Quador, J. (2014). "Un laboratorio virtual para la enseñanza del Krigeado Modelling. *Science Education and Learning*. (7), 73-82.
- Gómez, J. (2013). *Atlas Agroclimático de la República Mexicana*. (1er Ed.)[CD-ROM]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2013). Cambio climático 2013. Bases Físicas. Consulta: el 29 de marzo de 2016 [https://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_brochure_es.pdf].

- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). 2012. Gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático. Resumen para responsables de políticas. Consulta: 27 de Junio de 2016 [https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/IPCC_SREX_ES_web.pdf].
- Heim, R. (2002). *A Review of Twentieth Century Drought Indices Used in the United States. American*. Meteorological Society.
- Hurtado, G., Cadena, M. (2002). "Aplicación de índices de sequía en Colombia". *Meteorología Colombiana*. (5), 131-137.
- Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI) (2004). Guías para la Interpretación de Cartografía. Edafología. Agualientes, Ags.
- INEGI (2011). Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI). (2011). Censo de Población y Vivienda 2010. Tabulados del Cuestionario Básico. 2011. Consultas: Enero y febrero varios entre junio 2016 y febrero 2017 [<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/tabuladosbasicos/default.aspx?c=27302&s=est>].
- INEGI (2015). Instituto Nacional de Geografía y Estadística con datos de CONAGUA-Servicio Meteorológico Nacional. Climatología. Temperatura y Lluvias. Consulta 7 de julio de 2015 [<http://smn.cna.gob.mx>].
- INEGI (2017). Banco de Información Económica (BIE). Indicadores Financieros y Bursátiles; Cotización de dólares en el Mercado Cambiario Nacional. Consulta 10 de enero de 2017 [<http://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/>].
- INEGI (s. f-a). Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI). Sección: "Cuéntame. Extensión territorial. Consultas: enero y febrero [<http://www.cuentame.inegi.org.mx/territorio/extension/default.aspx?tema=T>].
- INEGI (s.f-b). Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI). (s/f). Sección: "Recursos naturales; Clima; Temperatura Media Anual. Consultas: Enero y febrero 2017 [<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/clima/infoescala.aspx>].
- INEGI (2013). El cultivo del frijol en Zacatecas. Censo Agropecuario 2007. Consulta: 22 de marzo de 2016 [<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825004089>].
- INEGI (2014). Anuario estadístico y geográfico de Zacatecas 2014. Consulta: 21 de agosto de 2016 [http://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/ZAC_ANUARIO_PDF.pdf].
- INEGI (2016). Conjunto de datos vectoriales. Escala 1:1 000 000 [<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/default.aspx>].
- INEGI (2016). Recursos Naturales. Datos vectoriales escala 1:250 000 serie V (Capa Unión). Consulta: 14 de noviembre de 2016 [<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usosuelo/>].

- INEGI (s.f). "Sección: "Cuéntame". Información por entidad. Consulta: enero y febrero de 2017 [<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/bcs/territorio/default.aspx?tema=me&e=03>].
- INEGI (s/f). "Sección: "Cuéntame". Territorio de México. Consulta: 22 de noviembre de 2016 [<http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/extension/default.aspx?tema=T>].
- INEGI-SAGARPA (2015). Boletín de prensa núm. 328/15 10 de agosto de 2015. Encuesta nacional agropecuaria (ENA) 2014 información relevante. Consulta: 10 de marzo de 2016 [http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/boletines/2015/especiales/especiales2015_08_8.pdf].
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2016). *Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático*. México.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. NY, USA. Consulta: el 29 de marzo de 2016 [<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>].
- La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, LA RED. (2012). *Perspectivas de investigación y acción frente al cambio climático en Latinoamérica*. Número especial de *Desastres y Sociedad* en el marco del XX Aniversario de La Red. Mérida, Venezuela. Consulta: 22 de septiembre de 2016 [http://www.desenredando.org/public/2012/LaRed_Desastres_y_Sociedad_2012-07_web.pdf].
- Landa, R., Magaña, V., Neri, C. (2008). *Agua y Clima elementos de adaptación para el cambio Climático*. México.
- Lavell, A (2012). Una nota sobre cambio y variabilidad. Gestión de riesgo y adaptación: ¿Hacia dónde vamos? En *Perspectivas de investigación y acción frente al cambio climático en Latinoamérica*. Número especial de *Desastres y Sociedad* en el marco del XX Aniversario de La Red. Mérida, Venezuela. Consulta: 22 de septiembre de 2016 [http://www.desenredando.org/public/2012/LaRed_Desastres_y_Sociedad_2012-07_web.pdf].
- Lavell, A. (1996). Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: Hacia la definición de una agenda de investigación: En *Ciudades en Riesgo, Degradación Ambiental, Degradación, Riesgos y Desastres*. Fernández, M. (compiladora) LA RED, ISAID. Lima Perú, pp. 12-42.
- Madrid, A. Ortiz, L. (2005) *Análisis y síntesis en cartografía: algunos procedimientos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Humanas.
- Magaña, V. (Editor) (2004). *Los impactos del Niño en México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación. México.
- Martínez, C. (2014). La Geografía de los riesgos en la región de Murcia. Consulta: 18 de diciembre de 2016 [<http://www.contraclave.es/geografia/GEOGRAFIA%20RIESGOS.pdf>].

- McKee, T. Doesken, J. and Kleist, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration to time scales". Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, pp. 179–184, January 17–22, Anaheim, California.
- Moreno, A. (2013). "Población y polución atmosférica intraurbana por dióxido de nitrógeno en Madrid: análisis desde la justicia ambiental basado en Sistemas de Información Geográfica". *Cuadernos Geográficos*, 84-107.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2016). El Niño and La Niña: Frequently asked questions. Consulta: el 5 de Octubre de 2016 [<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/el-ni%C3%B1o-and-la-ni%C3%B1a-frequently-asked-questions>].
- National Weather Service, NOAA (2006). What is Drought? Consulta: el día 02 de diciembre de 2014 [<http://www.nws.noaa.gov/om/brochures/climate/Drought.pdf>].
- National Drought Mitigation Center (2015). Program to Calculate Standardized Precipitation Index. The Standardized Precipitation Index. Consulta: 18 de febrero de 2015 [<http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx>].
- National Drought Mitigation Center (2016). Drought Basics. Consulta: 23 de septiembre de 2016 [<http://drought.unl.edu/DroughtBasics/WhatisDrought.aspx>].
- Nuñez, S., Nunez, L. Podesta, G., Skansi, M. (2005). El índice estandarizado de precipitación como herramienta para la caracterización y el monitoreo de la sequía: una prueba de concepto. Abstract submitted to CONGREGMET IX, 9th Argentine Congress of Meteorology. Consulta: 8 de noviembre de 2015 [<https://www.rsmas.miami.edu/users/agriculture/pubs/meetings/abstracts/SPI-SMN.pdf>].
- Oficina de Naciones Unidas para la Reducción de Riesgo de Desastres (UNISDR). (2015). Impacto de los desastres en América Latina y el Caribe 1990-2013. Tendencias y estadísticas para 22 países. Consulta: 20 de octubre de 2016 [<http://eird.org/americas/docs/impacto-de-los-desastres-en-america-latina-y-el-caribe-1990-2013.pdf>].
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de información Geográfica*. Consulta: 7 de noviembre de 2016 [<http://volaya.github.io/libro-sig/>].
- OMM y Asociación Mundial para el Agua (GWP) (2014). Directrices de política nacional para la gestión de sequías Modelo para la adopción de medidas. Serie 1 de herramientas y directrices del Programa de gestión integrada de sequías. OMM, Ginebra (Suiza) y GWP, Estocolmo (Suecia). Consulta: 2 de marzo de 2016 [http://www.droughtmanagement.info/literature/GWPWMO_IDMP_NDMPG_2014_es.pdf].
- OMM (2012). El tiempo, el clima y el agua, motores de nuestro futuro. OMM-N° 1084, 40 p. ISBN: 978-92-31084-2. Consulta: 30 de septiembre de 2015 [http://www.uca.es/recursos/doc/Unidades/Oficina_Verde/1107824976_2332012105148.pdf].

- OMM (2012). Índice normalizado de precipitación Guía del usuario. Consulta: 10 de noviembre de 2015
[http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_es_2012.pdf].
- OMM 2011. *Guía de prácticas climatológicas*. Consulta: 17 de enero de 2016
[http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/guide/documents/wmo_100_es.pdf].
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2016). Indicadores Mundiales Estacionales. Consulta: 27 de febrero de 2016
[http://www.fao.org/gIEWS/earthobservation/asis/index_1.jsp?lang=es].
- Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Asociación Mundial para el Agua (2016). Manual de indicadores e índices de sequía (M. Svoboda y B.A. Fuchs). Programa de gestión integrada de sequías, Serie 2 de herramientas y directrices para la gestión integrada de sequías. Ginebra. Consulta: 22 de Octubre de 2016
[http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP_Manual-de-indicadores_2016.pdf].
- Ortega, D., Velasco, I. (2013). "Aspectos socioeconómicos y ambientales de las sequías en México". Aqua-LAC. (5), 78 - 90.
- Palmer, W. (1965). *Meteorological Drought. Research paper* No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D. C.
- Ravelo, A. Sanz Ramos, R, Douriet Cárdenas, J. C. (2014). "Detección, evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte, México". *Agriscientia*, 31(1), 11-24.
- Ravelo, A., Sanz R. y Douriet, J. (2014). "Detección, evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte, México. AGRISCIENTIA, 2014. 31 (1), 11-24.
- Rojas, E., Arce, B., Peña, A., Boshell, F., & Ayarza, M. (2010). "Cuantificación e interpolación de tendencias locales de temperatura y precipitación en zonas alto andinas de Cundinamarca y Boyacá (Colombia)". *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11(2), 173-182.
- SAGARPA (s. f.). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Norma Técnica para la Generación de Estadística Básica Agropecuaria y Pesquera.
- SAGARPA (2015). Agenda técnica agrícola de Zacatecas. Consulta: 28 de Marzo de 2016
[https://www.extensionismo.mx/web2/documentos/agenda_tecnica/F32_Zacatecas.pdf].
- SAGARPA-Colegio de Postgraduados (COLPOS) (2012). Estimación de las Demandas de Consumo de Agua. Consulta: 22 de octubre de 2016
[http://www.sagarpa.gob.mx/desarrollorural/noticias/2012/documents/fichas%20tecnicas%20e%20instructivos%20nava/instructivo_demandas%20de%20agua.pdf].

- Salgado, M. Miranda, S. (2009). "Efectos de la sequía en la producción sembrada a nivel nacional en 2009". Consulta: 27 de enero de 2017 [<http://web.uaemex.mx/feconomia/Publicaciones/e204/EA-24-MaCarmen.pdf>].
- Santos, J., García, F. (2008). *Análisis estadístico de la información geográfica*. Universidad Nacional de educación distancia, Madrid.
- Saurí, D. (2003). "Tendencias recientes en el análisis geográfico de los riesgos ambientales". *Revista de Ciencias Sociales*. (23), 17-30.
- Secretaría de Agricultura Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) (s.f). Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Norma Técnica para la Generación de Estadística Básica Agropecuaria y Pesquera. Consulta: 28 de enero de 2017 [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105402/Normatividad_Estadistica.pdf].
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2013). Formulación de programas de medidas preventivas y de mitigación de la sequía. Consulta: 18 de septiembre de 2015 [<http://www.pronacose.gob.mx/pronacose14/contenido/documentos/MarcoTeorico.pdf>].
- SEMARNAT (2014). Versión de Difusión del Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018. Consulta: 17 de agosto de 2016 [http://www.cenapred.unam.mx/es/documentosWeb/Avisos/cambio_climatico.pdf].
- Serrano, V., Beguería, S., López J. (2010). "A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index – SPEI". *Journal of Climate*. (23), 1696-1718.
- Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera (SIAP). (2016). Producción Anual Agrícola; Cierre de la Producción Agrícola por Estado. Consultas: varias entre junio 2016 y marzo 2017 [<http://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119?idiom=es>].
- SIAP (2016). Acciones y Programas. Producción Anual Agrícola. Consulta: entre junio 2016 y febrero 2017 [<http://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119?idiom=es>].
- SIAP (2016). Atlas agroalimentario. Consulta: 15 de febrero de 2017 [http://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2016/Atlas-Agroalimentario-2016].
- Servicio Meteorológico Nacional. (2016). Base de Datos Climatológica. Consulta: 17 de enero de 2017 [<http://smn.conagua.gob.mx/es/8-smn-general/20-base-de-datos-climatologica>].
- SMN-CONAGUA (2016). Monitor de Sequía de América del Norte (NADM). Consulta: 17 de junio de 2016 [<http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-de-america-del-norte>].

- Solares, D. y García, A. (2014). "Percepciones campesinas indígenas acerca del cambio climático en la cuenca de Jovel, Chiapas" . México. *Cuadernos de antropología social*, (39), 63-89.
- Tobler, W. (1970). "A computer model simulation of urban growth in the Detroit region". *Economic Geography*. 46 (2).
- Vargas, J. (2002). Políticas públicas para la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres naturales y socio-naturales. Naciones Unidas. Santiago de Chile. Consulta el día 12 de noviembre de 2016 [http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/5749/1/S2002612_es.pdf].
- Velazco, I. Aparicio, J. (2004). "Evaluación de índices de sequía en las cuencas de afluentes del río Bravo/Grande". *Ingeniería Hidráulica en México*. (19), 37-53.
- Wilhite, D. (2000): Drought as a natural hazard: concepts and definitions. In Drought: a global assessment. (1), 3-18. Consulta, 23 de marzo de 2015 [<http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1068&context=droughtfacpub>].
- Wilhite, D., Glantz, M. (1985). "Understanding the drought phenomenon: the role of definitions". *Water*. Consulta: 21 de noviembre de 2016 [<http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1019&context=droughtfacpub>].
- Zargar, A., Sadiq R., Naser B., y Khan F. I. (2011). "A review of drought indices". *Environmental Reviews*, 19(1), 333-349.