



Quinto
Congreso Nacional
de Riego y Drenaje
COMEII-AURPAES 2019

Septiembre 2019 | Mazatlán, Sinaloa



Artículo: COMEII-19024

Mazatlán, Sin., del 18 al 20

de septiembre de 2019

MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA DE SEQUÍA EN LA AGRICULTURA: EVALUACIÓN DEL SISTEMA DEL ÍNDICE DE ESTRÉS AGRÍCOLA (ASIS-País) DE LA FAO

David Ortega-Gaucin^{1*}; Alejandro Ordoñez¹; Oscar Rojas²; Tamara Hernández²;
Jesús de la Cruz¹

¹Coordinación de Hidrología. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

dortega@tlaloc.imta.mx – 777-329-36-00 Ext. 674 (*Autor de correspondencia)

²Oficina Regional de la FAO para América Latina y El Caribe. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Edificio 238 3º Planta, Ciudad del Saber, Clayton Ciudad de Panamá, Panamá.

Resumen

Reconociendo que el problema de la sequía es muy importante para la agricultura debido a su impacto en la seguridad alimentaria mundial, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ha desarrollado una herramienta para apoyar a los países en el fortalecimiento de sus sistemas de monitoreo y alerta temprana de sequía en la agricultura. Esta herramienta se denomina Sistema del Índice de Estrés Agrícola (*Agriculture Stress Index System*, ASIS, por sus siglas en inglés) en su versión País (ASIS-País), el cual se basa en información satelital y tiene como objetivo simular el análisis que un experto en sensores remotos haría y simplificar los resultados en forma de mapas para los usuarios finales. Así, el objetivo del presente trabajo consiste en implementar y evaluar en México la potencialidad del sistema ASIS-País para realizar el monitoreo periódico (cada diez días) y la previsión probabilística de la sequía en zonas agrícolas. Para ello, se ha elegido como zona de estudio piloto el estado de Zacatecas, cuya actividad agrícola ha sido severamente afectada por la sequía en los últimos años. Los resultados preliminares indican que la herramienta ASIS-País, calibrada con información de campo a nivel estatal y municipal (mapa de cobertura de cultivos, fechas de siembra y cosecha, coeficientes de cultivo y estadísticas de producción agrícola), permite detectar con bastante precisión los periodos de estrés hídrico, identificando las áreas agrícolas que presentan mayor probabilidad de ocurrencia de sequía.

Palabras claves: sequía agrícola, seguridad alimentaria, estrés hídrico, cultivos básicos, Zacatecas.



Introducción

La sequía es un fenómeno natural de lento desarrollo que tiene impactos negativos sobre alrededor de un 60% del sector agropecuario en todo el mundo (FAO, 2015a). Por sus efectos en la producción de alimentos y en el acceso a recursos ambientales (agua, flora y fauna silvestres), pone en peligro el sustento y la vida de millones de familias, sobre todo las que habitan en el campo.

En México las sequías representan una amenaza para la seguridad hídrica y alimentaria. Esto ha quedado de manifiesto durante las sequías registradas a través de su historia y, sobre todo, en el pasado reciente, como sucedió en el período de 2011-2012, el cual ha sido evaluado como el más severo de los últimos setenta años debido a sus efectos negativos en los diversos sectores socioeconómicos (Ortega-Gaucin y Velasco, 2013). Esta sequía afectó más del 80% del territorio nacional y causó pérdidas en más de 800 mil hectáreas de cultivos, además de perjudicar a 1.3 millones de cabezas de ganado, principalmente bovino (CENAPRED, 2012); igualmente, provocó serios problemas de desabasto de agua en algunas ciudades y en las comunidades rurales de las regiones más áridas y vulnerables del país.

Uno de los pilares fundamentales de la gestión del riesgo de sequía, es el monitoreo y la alerta temprana del fenómeno. En nuestro país, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es la dependencia oficial encargada de realizar estas actividades a través del Monitor de Sequía en México (MSM), y publica quincenalmente un mapa con las áreas afectadas y la severidad del fenómeno a nivel de cuenca, estado y municipio. La metodología del MSM se basa en la obtención e interpretación de diversos tipos de índices e indicadores de sequía, tales como: el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y la Anomalía de Lluvia en Porcentaje de lo Normal (PPN), que cuantifican las condiciones de déficit o exceso de precipitación; el Índice de Salud de la Vegetación (VHI) y el Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI), que miden el grado de estrés de la vegetación a través de la radiancia observada en imágenes de satélite; el Modelo de Humedad del Suelo Leaky Bucket CPC-NOAA, que estima la humedad del suelo mediante un modelo hidrológico de una capa; entre otros. Todos estos índices se despliegan en capas o layers a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG) y mediante un consenso se determinan las regiones del país afectadas por sequía con diferente grado de intensidad (SMN, 2019).

Aunque este monitor es útil para proporcionar un panorama general de la situación de la sequía a nivel nacional, presenta varias desventajas que no le permiten ser totalmente operativo para la toma de decisiones en tiempo real. En principio, en la elaboración del mapa de sequía que publica quincenalmente el MSM, no se utiliza un método objetivo y sistematizado para asignarle un peso específico a cada uno de los indicadores e índices que lo integran, por lo que la delimitación de las áreas con sequía queda a criterio de los expertos que lo elaboran. Además, al incluir y combinar diversos tipos de índices de sequía (de tipo meteorológico, agrícola e hidrológico), no permite diferenciar y reconocer los impactos del fenómeno en los diferentes sectores usuarios de agua (agrícola,



pecuario, industrial, público urbano, etc.), por lo que es insuficiente para la toma de decisiones en sectores específicos como la agricultura, la ganadería o los sistemas de agua potable, ya que tampoco considera la relación entre la oferta y la demanda de agua (balance hídrico) para los diversos tipos de usos consuntivos. Específicamente, en lo relativo a los índices que se utilizan para monitorear el estado de la vegetación (VHI y NDVI), que a su vez son útiles para conocer las condiciones de sequía en la agricultura, éstos se obtienen de imágenes de satélite, pero no son calibrados con información de campo (etapas fenológicas de los cultivos, fechas de siembra y cosecha, etc.), por lo que no permiten estimar la probabilidad de ocurrencia de sequía agrícola ni emitir alertas oportunas para este sector, con cierto grado de confiabilidad.

Por otro lado, reconociendo que el problema de la sequía es muy importante para la agricultura debido a su impacto en la seguridad alimentaria mundial, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ha desarrollado una herramienta para monitorear y detectar a nivel global las áreas agrícolas donde los cultivos podrían ser afectados por sequía. Esta herramienta se denomina Sistema del Índice de Estrés Agrícola (ASIS), el cual se basa en el Índice de Salud Vegetal (VHI) y es generado a partir de información satelital. El sistema es operacional en FAO-Roma a nivel global como apoyo técnico del Sistema Global de Información y Alerta Temprana (*Global Information and Early Warning System*, GIEWS, por sus siglas en inglés).

Con base en los principios metodológicos generales del sistema ASIS-Global y con el propósito de apoyar a los países en el fortalecimiento de sus sistemas de monitoreo y alerta temprana de la sequía en la agricultura, la FAO desarrolló la versión País de este sistema, denominado ASIS-País, el cual tiene como objetivo simular el análisis que un experto en sensores remotos haría y simplificar los resultados en forma de mapas para los usuarios finales (Rojas, 2016). La herramienta es de libre acceso, y puede y debe ser calibrada con información de terreno (mapas de uso actual del suelo, fechas de siembra, duración del ciclo del cultivo y coeficientes de cultivo), además de que ofrece una mayor precisión que la herramienta global en detectar períodos de estrés hídrico en cultivos. La vigilancia de la sequía es continua, FAO suministra en forma gratuita la información satelital cada diez días, lapso de tiempo ideal para el monitoreo de los cultivos anuales porque considera el aporte de agua en la reserva hídrica de los suelos (los cálculos de probabilidad se basan en un registro histórico de imágenes de satélite de 35 años que también son proporcionadas gratuitamente por la FAO). Los resultados finales de ASIS-País se resumen en mapas de fácil interpretación para los tomadores de decisiones, para que se implementen a tiempo las actividades de prevención y mitigación de la sequía en la agricultura. Estos resultados también pueden ser útiles para construir modelos de predicción de rendimientos de los cultivos por medio de regresiones múltiples, para detonar el pago de la indemnización de seguros agrícolas indexados, o para guiar las inversiones públicas como los sistemas de cosecha de agua, el riego, las reservas de agua, etc. dado que el sistema identifica las unidades administrativas o agroecológicas que presentan mayor probabilidad de ocurrencia de sequía (Rojas, 2016).

En este contexto, con base en los antecedentes descritos anteriormente, el presente trabajo tiene como objetivo implementar y evaluar en México el sistema de vigilancia de la sequía agrícola denominado ASIS-País, utilizando la información que de él se obtenga

para predecir las áreas agrícolas afectadas por sequía en forma probabilística. Siguiendo las recomendaciones de los expertos de la FAO, para la calibración e implementación del sistema se requiere definir un área de estudio con importancia agrícola y que sea propensa a padecer los efectos de la sequía con cierta frecuencia. Idealmente el área de estudio puede ser, por ejemplo, un estado, una cuenca hidrológica, un distrito de riego o un distrito de desarrollo rural. En este caso, hemos optado por la primera opción al elegir el estado de Zacatecas como área de estudio, el cual cumple los requisitos mencionados arriba.

Materiales y métodos

Fundamentos de ASIS

El sistema de vigilancia de la sequía agrícola se fundamenta en los principios básicos de absorción, transmisión y reflexión de energía proveniente del Sol. Las plantas, en el espectro solar conocido como visible, utilizan en mayor grado la longitud de onda correspondiente al rojo para realizar el proceso de fotosíntesis. Cuando se presenta un estrés hídrico, las plantas cierran sus estomas para protegerse de la deshidratación, sin embargo, es por los estomas que ellas absorben el dióxido de carbono atmosférico, también necesario para la fotosíntesis, dando como resultado una reducción en la producción de biomasa. El estrés hídrico tendrá un efecto mayor en la reducción de los rendimientos si se presenta en una fase fenológica sensible a la falta de agua como es la floración, el llenado de grano o la fructificación (FAO, 2015b). La Figura 1 representa este proceso.

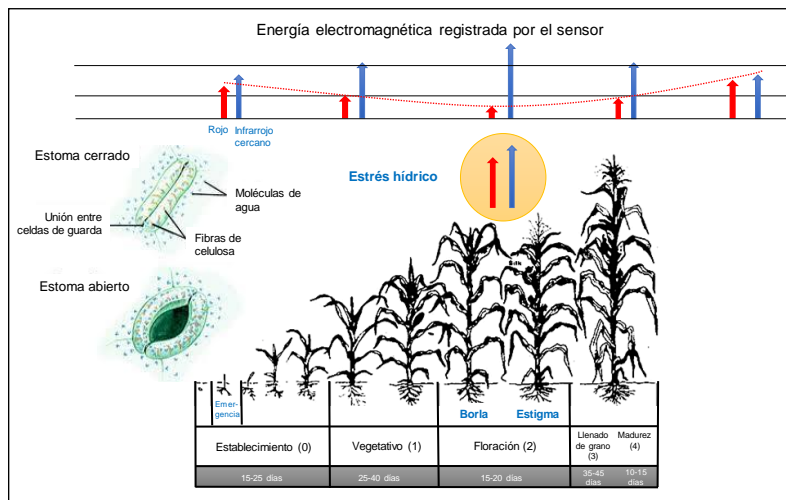


Figura 1. Representación gráfica de cómo la energía es capturada por el satélite. Las flechas rojas representan la longitud de onda roja y las azules la longitud de onda infrarroja cercana. Cuando se presenta un estrés hídrico, el satélite captura una mayor proporción de longitud de onda roja y una menor cantidad de la infrarroja. Este principio básico permite detectar la sequía en la agricultura. Fuente: adaptada de FAO (2015b).

ASIS utiliza el Índice de Salud Vegetal (VHI) para la evaluación de la sequía agrícola. Este índice es resultado de los trabajos realizados por Kogan (1995 y 1997) en la



Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los Estados Unidos, y ha sido exitosamente aplicado en numerosos estudios y en diferentes condiciones ambientales alrededor del mundo, incluyendo Asia, África, Europa y las Américas. Constituye una de las primeras tentativas de vigilar y detectar los efectos de la sequía en la agricultura mediante datos obtenidos por teledetección (OMM/GWP, 2016). Para obtenerlo, se utilizan imágenes de satélite provenientes del sensor denominado Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR) obtenidas en los canales visibles e infrarrojo cercano para detectar y clasificar el estrés de la vegetación causado por sequía (con base en el principio básico mencionado anteriormente).

El VHI es un índice compuesto por la unión del Índice de Condición de la Vegetación (VCI) y el Índice de Condición de la Temperatura (TCI). El VCI (Kogan, 1994) se deriva a su vez del Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI). Este último es una medida indirecta de la producción primaria a través de su relación con la radiación fotosintéticamente activa (Rojas *et al.*, 2011). El VCI ubica el NDVI entre el máximo y el mínimo de la serie histórica de la información satelital y se expresa como:

$$VCI_i = \frac{NDVI_i - NDVI_{mín}}{NDVI_{máx} - NDVI_{mín}} \quad (1)$$

Donde:

VCI_i = Índice de Condición de la Vegetación para la decena i (período de 10 días i).

$NDVI_i$ = Índice Diferencial Normalizado de Vegetación para la decena i .

$NDVI_{máx}$ = Valor máximo absoluto de la serie histórica de los índices NDVI.

$NDVI_{mín}$ = Valor mínimo absoluto de la serie histórica de los índices NDVI.

El VCI fue diseñado para separar el componente climático del componente ecológico que afecta el valor del índice de vegetación NDVI. En general, el VCI captura mejor la dinámica de la precipitación que el NDVI particularmente en áreas geográficas heterogéneas. EL VCI no sólo refleja la variabilidad espacial y temporal de la vegetación, sino que también permite cuantificar el impacto del clima en la vegetación (Kogan, 1994; Unganai y Kogan, 1998).

Por otro lado, el Índice de Condición de la Temperatura (TCI) se calcula de manera similar al VCI, pero éste relaciona la temperatura estimada por la banda infrarroja del sensor AVHRR (canal 4). Kogan (1995) propuso este índice para remover el efecto distorsionante de las nubes en la evaluación satelital de la condición de la vegetación debido al hecho de que el canal 4 del sensor AVHRR es menos sensible al vapor de agua en la atmósfera en comparación con la luz visible. Las altas temperaturas en medio del ciclo de cultivo indican condiciones desfavorables o de sequía, mientras que las bajas temperaturas indican mayormente condiciones favorables (Kogan, 1995). En consecuencia, la expresión del índice es:

$$TCI_i = \frac{T_{máx} - T_i}{T_{máx} - T_{mín}} \quad (2)$$

Donde:

TCI_i = Índice de Condición de la Temperatura para la decena i .



- T_i = Temperatura de la decena i .
 T_{max} = Valor máximo absoluto de temperatura de la serie histórica.
 T_{min} = Valor mínimo absoluto de temperatura de la serie histórica.

Finalmente, a partir de estos dos índices se calcula el Índice de Salud de la Vegetación (VHI), cuya expresión matemática es la siguiente:

$$VHI_i = a * VCI_i + (1 - a) * TCI_i \quad (3)$$

Así, el VHI es la combinación aditiva del VCI y TCI para cada período de diez días (decena i). Los parámetros a y $(1-a)$ tienen diferente peso según el cultivo que se analice. En condiciones cercanas a lo normal, la vegetación es más sensible a la humedad durante la formación de las hojas, y a la temperatura durante la floración (Rojas, 2016).

Este índice es el indicador más elemental y la entrada principal para la herramienta ASIS-País, y está disponible por pixel y por decena. La idea básica de este índice es la siguiente: cuanto menor sea el VCI observado (vegetación verde relativamente pobre) y mayor sea el TCI observado (temperatura relativamente cálida), menor será el VHI. Los VHIs bajos son indicadores de sequía, especialmente cuando persisten por largos períodos de tiempo (Hernández, 2018b). Con base en estos datos, ASIS-País evalúa la severidad (intensidad, duración y extensión espacial) de la sequía agrícola y presenta los resultados finales a nivel de unidad administrativa (estado, municipio, distrito, etc.) o agroecológica, lo cual permite compararlos con las estadísticas agrícolas del área bajo estudio.

El *primer paso* de ASIS-País es calcular el promedio de VHI conforme avanza el desarrollo del cultivo (escala temporal), lo que permite evaluar la intensidad y duración de los períodos secos dentro del ciclo de cultivo a nivel de pixel (ver Figura 2, izquierda). El sistema se basa en un archivo histórico de más de 30 años de registro (1984-2019) de información satelital sobre los índices VCI y TCI. Este período de registro garantiza que la serie contenga un evento extremo de sequía, lo cual no sucede cuando se utilizan series cortas. Para lograr esta serie de datos satelitales, se realizó un estudio de “intercalibración” entre los datos generados por el satélite NOAA-AVRRH (disponibles a partir de 1984 con 16 km de resolución) y METOP-AVRRH (disponibles a partir de 2007 con una resolución de 1 km) (FAO, 2015b).

Al inicio del ciclo de cultivo la probabilidad se basa en la probabilidad histórica del pixel con base en la serie histórica de más de 30 años. Conforme se avanza en el ciclo agrícola, cada diez días se cuenta con una información nueva de la evolución actual de la vegetación a nivel del pixel, lo cual permite ajustar la probabilidad histórica con la información reciente. Transcurrido la mitad del ciclo de cultivo o más, dicha probabilidad es más precisa reduciendo el error de omisión o de acertar la clasificación final del pixel en seco o no.

El *segundo paso* es el cálculo del porcentaje de área agrícola afectada por sequía (pixeles con $VHI < 0.35$, un valor identificado como crítico en estudios previos), para evaluar la

extensión del fenómeno (escala espacial) (ver Figura 2, derecha). Para ello, la herramienta determina el Índice de Estrés Agrícola (ASI), el cual es un indicador que manifiesta las anomalías en el crecimiento de la vegetación y sequías potenciales en áreas de cultivo durante un determinado ciclo agrícola. Este índice representa el porcentaje de pixeles de un tipo de cultivo o uso de la tierra específico dentro de cada área administrativa, que es afectado por sequía a lo largo del ciclo agrícola. Los pixeles con valor de ASI por debajo del umbral de 35% son identificados como sequía. Cuando más del 50% del área cultivada está siendo afectada por sequía, se puede asumir que se está afrontando un evento de sequía extrema con serios impactos en la seguridad alimentaria (Hernández, 2018b). La Figura 2 ilustra el cálculo de ASI mediante un ejemplo ficticio de una región de 10x10 pixeles.

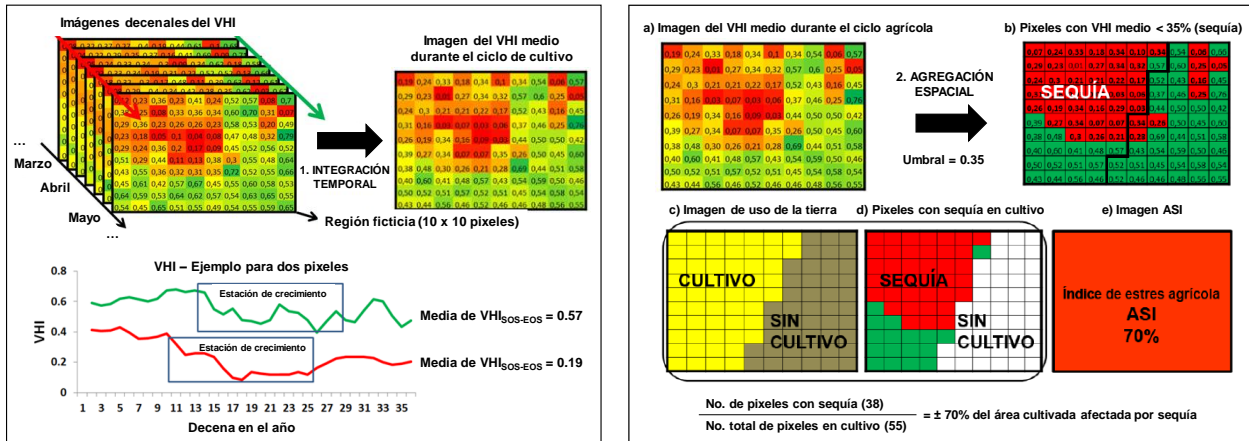


Figura 2. Representación gráfica de la integración temporal y espacial del VHI en una región ficticia de 10x10 pixeles para el cálculo del Índice de Estrés Agrícola (ASI). A partir de una serie histórica de imágenes decenales del VHI sobre el área administrativa de estudio, se obtiene el VHI medio por pixel para el ciclo de cultivo (izquierda); posteriormente, con base en el raster del VHI medio se realiza una integración espacial que considera únicamente el área cultivada (derecha). El índice ASI es el porcentaje del área de cultivo dentro del área administrativa con valores de la media de VHI inferiores a 0.35. Todos los pixeles del área administrativa adquieren el valor de ASI. Fuente: adaptada de Van *et al.* (2016) y Hernández (2018b).

Los valores del índice ASI varían de 0 a 1, y se clasifican como se indica en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación del grado de severidad de sequía agrícola según el índice ASI.

Valor de ASI	Categoría de sequía
<0.25	Extrema
0.25 a 0.35	Severa
0.36 a 0.38	Moderada
0.39 a 0.42	Leve
>0.42	Ninguna

Fuente: Hernández (2018b).

Finalmente, los valores de ASI pueden ser utilizados como variable independiente para predecir los rendimientos de los cultivos agrícolas por medio de regresiones múltiples.

Descripción del área de estudio

El estado de Zacatecas se ubica en la región centro-norte de México (en la región fisiográfica del Altiplano) y se caracteriza por tener zonas áridas (clima seco o semiseco) en más del 75% de su territorio (Figura 3), razón por la cual es muy vulnerable ante la presencia de sequías y, de hecho, ha sido uno de los estados más afectados por este fenómeno en los últimos años. La agricultura y la ganadería son dos de las principales actividades económicas de Zacatecas, pues el 79% de su superficie ofrece condiciones favorables para las actividades agropecuarias. Del área total dedicada a la siembra agrícola (1.3 millones de hectáreas), el 57.9% se destina al cultivo del frijol, ocupando el primer lugar a nivel nacional en la producción de esta leguminosa. Luego sigue el maíz con 27.3% de la superficie sembrada, la avena forrajera con 4.9%, el chile con 2.6%, y el porcentaje restante (7.3%) se distribuye entre otros cultivos de menor importancia (SIAP, 2019).

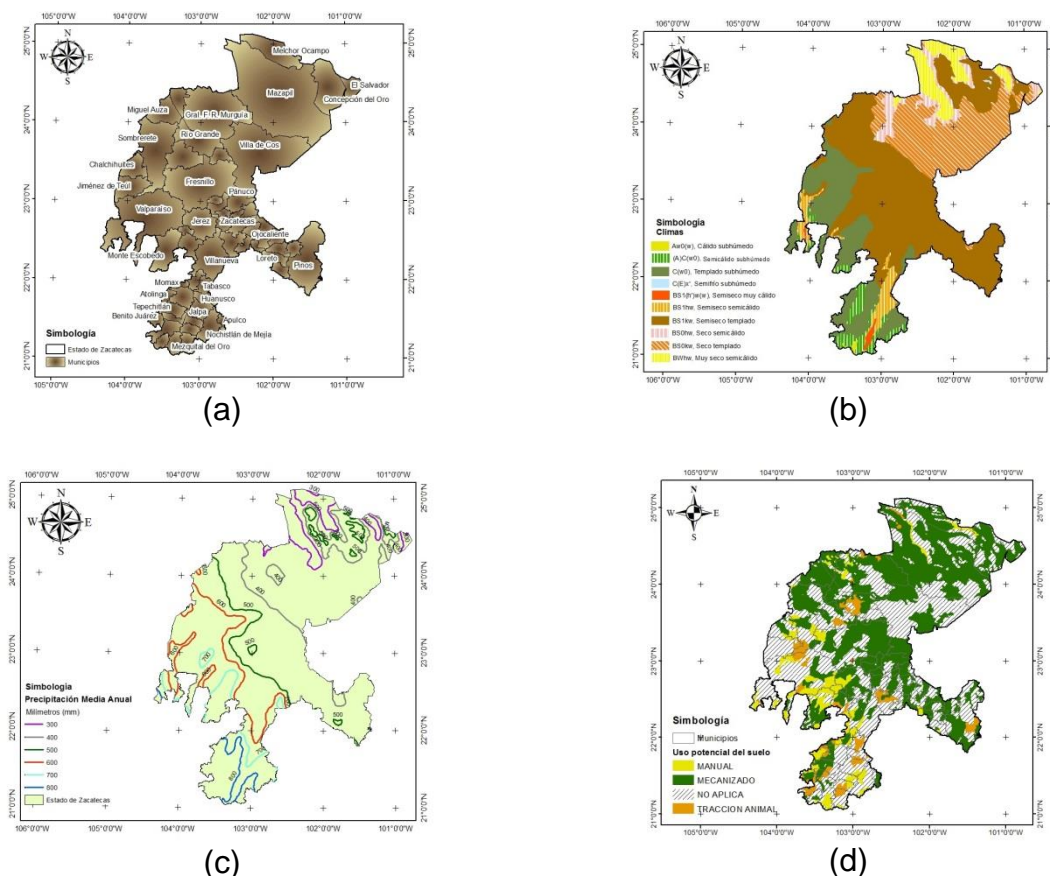


Figura 3. (a) División municipal del estado de Zacatecas; (b) Tipos de climas; (c) Isoyetas anuales; y (d) Uso potencial del suelo. Fuente: elaboración propia con base en INEGI.

Calibración y adaptación de ASIS-País en la zona de estudio

Para llevar a cabo esta etapa, se ha seguido el protocolo para el proceso de calibración y adaptación nacional de la herramienta ASIS-País, con base en las recomendaciones de Rojas (2016) y Hernández (2018a y 2018b), quienes describen los pasos que son necesarios para la implementación del sistema a nivel de país (aunque en este caso se realizó en un estado de la República Mexicana) y la calibración necesaria para obtener una mayor precisión en el monitoreo y previsión probabilística de la sequía agrícola. A grandes rasgos, la metodología se esquematiza en la Figura 4 y se describe en los incisos siguientes.

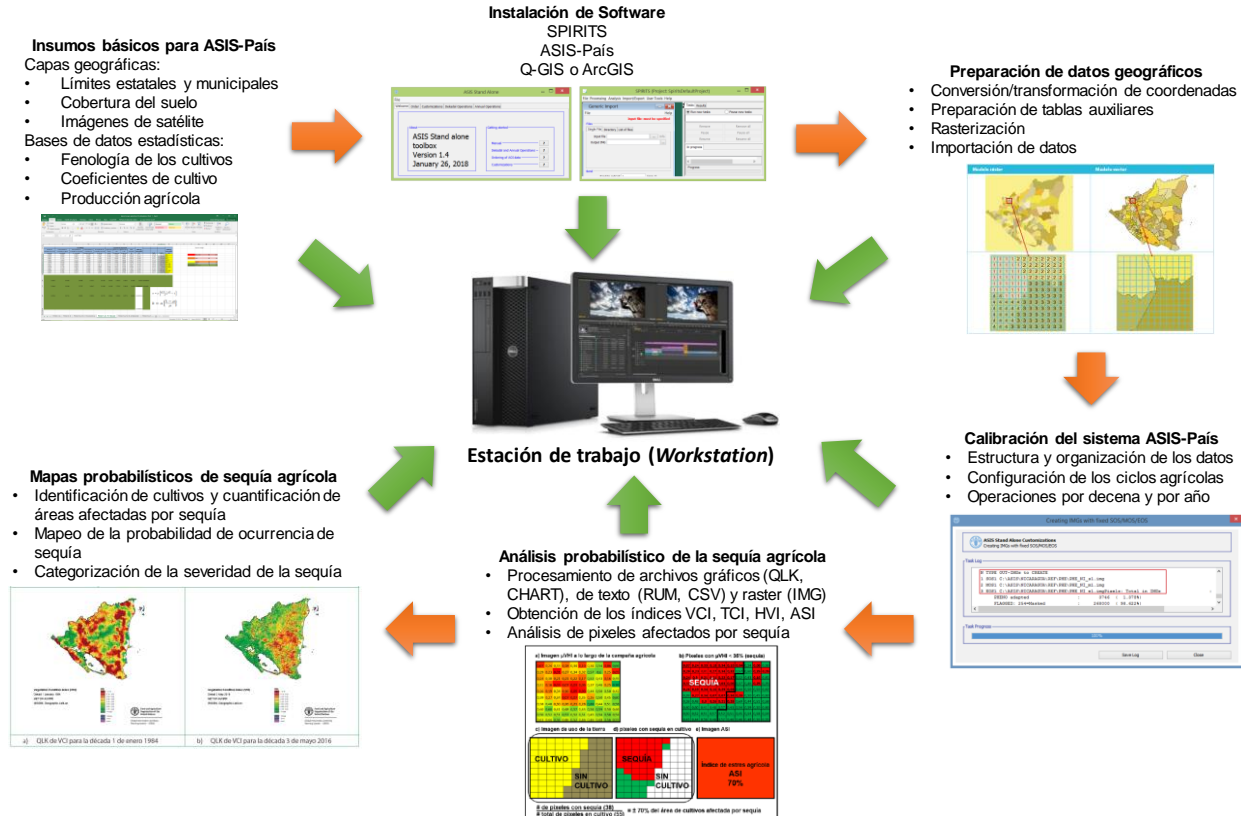


Figura 4. Diagrama conceptual de la metodología para la calibración y adaptación de la herramienta ASIS-País en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

a) Recopilación de información y preparación de datos geográficos

Los datos de insumo para el sistema consisten básicamente en tres tipos: datos vectoriales (tipo *shapefile*), datos raster (imágenes georeferenciadas) y tablas de datos. A fin de utilizarlos con la herramienta ASIS- País, es necesario efectuar algunos procesos de conversión a los formatos de imagen requeridos. ASIS-País realiza todos los cálculos de los parámetros y datos de salida con archivos raster.

La información requerida es la siguiente: a) Mapa de división administrativa (estados, municipios, distritos de desarrollo rural, etc.); b) Mapa de cobertura de uso del suelo

(máscara de cultivos); c) Datos sobre fenología de los cultivos básicos seleccionados (fechas de siembra y cosecha, y coeficientes de cultivo).

El mapa de división administrativa del estado de Zacatecas se obtuvo del Marco Geoestadístico de México elaborado por el INEGI (2018), el cual es un archivo vectorial (*shapefile*) que contiene la información de las áreas geoestadísticas estatales y municipales, así como los polígonos de las localidades urbanas y rurales, entre otros. En este caso, la unidad administrativa de interés es el municipio, debido a que la información estadística de producción agrícola se tiene disponible a ese nivel, por lo que sólo se trabajó con la división municipal, tal como se ilustra en la Figura 3(a) (descrita en el apartado anterior). Este archivo fue convertido a formato raster mediante geoprocésamiento a través del software SPIRITS (Software for the Processing and Interpretation of Remotely Sensed Image Time Series), siguiendo el procedimiento descrito por Hernández (2018a).

Con respecto al mapa de cobertura de uso del suelo (máscara de cultivos), éste es considerado el insumo fundamental para el monitoreo de la sequía agrícola, pues contiene el parcelamiento de los cultivos básicos que son monitoreados. En este caso, considerando el mandato de FAO, que estos cultivos estén vinculados con la seguridad alimentaria para garantizar a los pobladores una dieta básica, se seleccionaron cuatro cultivos: frijol, maíz, trigo grano y sorgo grano. Para la zona de estudio, la máscara de cultivos fue proporcionada por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2015), en formato vectorial (*shapefile*), el cual fue convertido a formato raster de manera similar al mapa de división administrativa, con lo cual se obtuvo el mapa que se presenta en la Figura 5.

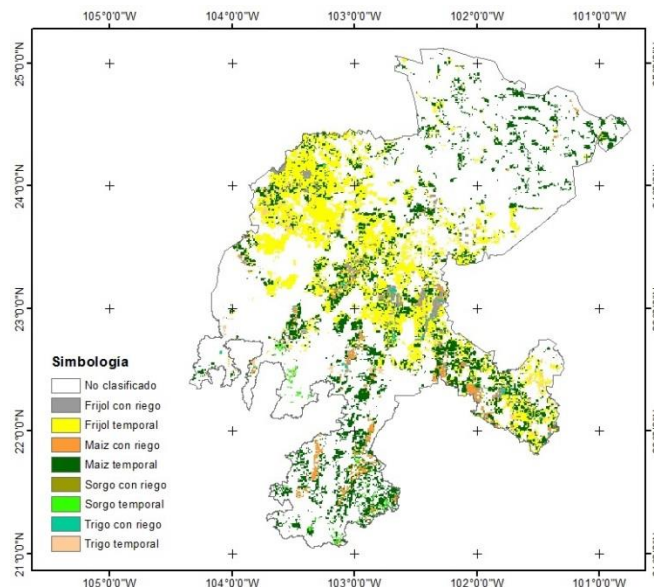


Figura 5. Máscara de cultivos básicos de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con base en SIAP (2015).

Como se puede apreciar en este mapa, el cultivo predominante en el estado de Zacatecas es el frijol; este producto se siembra en la zona centro del estado principalmente, con

tendencia al noroeste y sureste del mismo. En el caso del maíz de grano, su siembra se ve acentuada en el sureste del estado, sin embargo, se aprecia su siembra de manera dispersa en el centro, norte y sur del mismo. El cultivo de sorgo de grano y trigo de grano se realizan de manera muy dispersa y en pequeña escala en la zona centro y hacia el sur del estado. La herramienta ASIS-País analiza independientemente las áreas agrícolas dedicadas por ejemplo al maíz de las áreas cultivadas con frijol. Esto garantiza una mayor correlación entre el rendimiento del cultivo y el Índice de Estrés Agrícola (ASI) que representa el área afectada por sequía de la unidad de producción seleccionada como análisis.

En lo relativo a la información sobre fenología de los cultivos seleccionados, ésta se refiere básicamente a los datos de los coeficientes de cultivo (K_c), y las fechas de siembra y cosecha. Los K_c se utilizan para darle diferente peso a las distintas fases fenológicas. Por ejemplo, en los cereales la fase fenológica de la floración y llenado del grano es más sensible al estrés hídrico, por lo que el valor del K_c es mayor durante esta fase fenológica para asignarle un peso preponderante al realizar la integración temporal del VHI. La recomendación de FAO es que, en caso de que no existan estudios de lisímetros en la zona de estudio para determinar los K_c , se utilicen los valores generales de K_c publicados en la literatura. En este caso, se tomaron los valores indicados en el Manual 56 de la FAO (2006), los cuales se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Coeficientes de cultivo (K_c) para los cultivos básicos seleccionados.

No.	Cultivo	K_c ini	K_c med	K_c fin	Altura máx. (m)
1	Maíz grano	0.7	1.2	0.60-0.35	2.00
2	Frijol	0.4	1.15	0.35	0.40
3	Sorgo grano	0.7	1.0-1.10	0.55	1.00-2.00
4	Trigo grano	0.7	1.15	0.40-0.25	1.00

Fuente: elaboración propia con base en FAO (2006).

Además de los coeficientes de cultivo (cuyos valores generalmente varían entre 0.3 y 1.2), es necesario recopilar las fechas de siembra y cosecha de los cultivos, con base en la duración del ciclo vegetativo de cada uno de ellos. Estos datos fueron obtenidos del documento “Agenda Técnica Agrícola de Zacatecas” (INIFAP, 2017) y del informe “El cultivo del frijol en Zacatecas” (INEGI, 2007). Estas fechas pueden variar de un municipio a otro con diferencia de algunos días o semanas, pero en este caso se consideró una fecha promedio para todos los municipios del estado, tomando en cuenta los períodos de siembra y cosecha a nivel estatal. La herramienta ASIS-País requiere que estas fechas estén expresadas en forma de decena (período de diez días), iniciando la contabilización de las decenas a partir de la primera del año (1-10 de enero). Así, por ejemplo, si la fecha de siembra de un cultivo fuera el 25 de enero, ésta correspondería a la tercera decena del año; y si fuera el 5 de abril, estaría dentro de la décima decena del año. De esta manera, en el Cuadro 3 se presentan los períodos de siembra y cosecha de los cultivos seleccionados, expresados en fechas de calendario y en las decenas del año correspondientes (decena promedio del período respectivo).

Cuadro 3. Fechas de siembra y cosecha de cultivos básicos de Zacatecas.

No.	Cultivo	Modalidad	Período de siembra	Fecha de siembra promedio, expresada en decena del año	Ciclo vegetativo (días)	Período de cosecha	Fecha de cosecha promedio, expresada en decena del año
1	Maíz	Riego	20 Abril - 24 Mayo	13	153	4-9 Octubre	28
2	Frijol	Riego	15 Mayo -15 Junio	16	95	5 -15 Sep.	26
3	Sorgo	Riego	15 Mayo -15 Junio	16	110	15 Sep. - 5 Oct.	27
4	Trigo	Riego	15 Dic. - 20 Enero	36	120	30 de Abril	12
5	Maíz	Temporal	15 Junio - 15 Julio	19	153	7 Dic. - 12 Dic.	35
6	Frijol	Temporal	15 Junio - 15 Julio	19	95	8 -18 Octubre	29
7	Sorgo	Temporal	15 Junio - 15 Julio	19	110	18 Oct - 7 Nov	30
8	Trigo	Temporal	15 Junio - 15 Julio	19	120	07-Nov	31

Fuente: elaboración propia.

b) Instalación y calibración del sistema

De acuerdo con el protocolo de calibración mencionado anteriormente, para la instalación y procesamiento del sistema ASIS-País se debe disponer de una computadora con un disco duro de capacidad ideal de 10 TB dedicada exclusivamente al sistema de monitoreo de la sequía agrícola. Esta computadora fue adquirida en este proyecto mediante el gasto de inversión solicitado al CONACYT, y el software fue proporcionado de manera gratuita por la FAO. Para la instalación y calibración del sistema, se contó con la asesoría de los expertos de la FAO, quienes brindaron el acompañamiento técnico en este proceso, así como los manuales para el uso de la herramienta. La información histórica de 35 años de registro (1984-2019) fue descargada vía FTP (file transfer protocol) de FAO HQ (Roma) y se actualiza cada 10 días por la misma vía. Los índices de vegetación básicos que se descargan son: Índice de Condición de la Vegetación (VCI) e Índice de Condición de la Temperatura (TCI). Estos índices sirven para calcular el Índice de Salud Vegetal (VHI), tal como se mencionó anteriormente. En la Figura 6 se presenta un ejemplo de imagen de los índices mencionados (VCI y TCI) para la zona de estudio.

c) Análisis probabilístico de la sequía agrícola

El sistema ASIS-País permite calcular la probabilidad de que un pixel específico a mitad del ciclo de cultivo sea clasificado al final del ciclo como un pixel afectado por sequía. ASIS-País tiene esta aplicación predictiva con significancia estadística. Al inicio del ciclo la probabilidad se basa en la probabilidad histórica del pixel con base en la serie histórica de 30 años. Conforme se avanza en el ciclo agrícola, cada diez días se cuenta con una información nueva de la evolución actual de la vegetación a nivel del pixel, lo cual permite ajustar la probabilidad histórica con la información reciente. Transcurrido la mitad del ciclo de cultivo o más, dicha probabilidad es más precisa reduciendo el error de omisión o de acertar la clasificación final del pixel en seco o no. Esta probabilidad es calculada a nivel

de pixel permitiendo realizar mapas con información a 1 km² de resolución (un pixel equivale a 1 km²). Las estadísticas relacionadas con la probabilidad calculada son expresadas también en forma de mapas para facilitar al usuario la verificación visual de la validez estadística de la probabilidad.

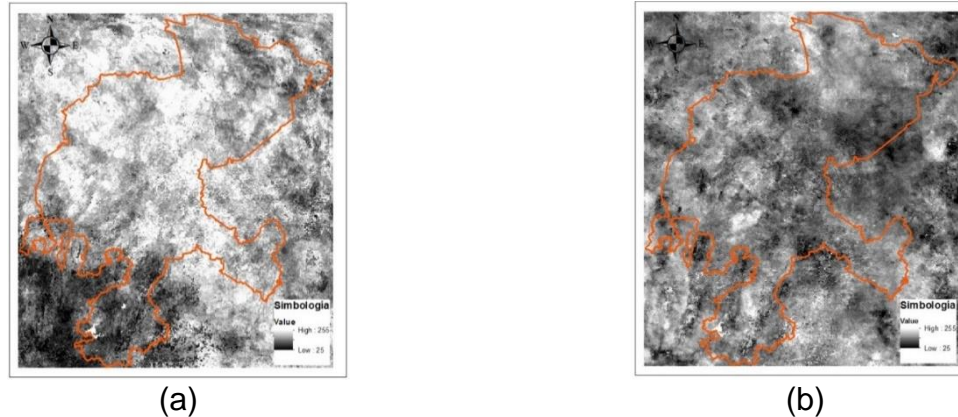


Figura 6. Índices TCI (a) y VCI (b) correspondientes a la segunda decena de junio del año 2011. Fuente: elaboración propia con información de FAO.

Resultados y Discusión

En la Figura 7 se muestran los mapas de Zacatecas con los valores medios anuales del Índice de Salud Vegetal (1985-2019), donde se observan las áreas agrícolas de los cultivos de interés que tuvieron mayor o menor estrés hídrico en cada uno de los años analizados. Como se puede observar en dicha figura, se identifican cuatro años con episodios de sequía severos: 1989, 1997, 2001 y 2011. De éstos, el más documentado por sus repercusiones a nivel nacional fue el evento del 2011, donde se presentó la peor sequía en los estados del norte y centro del país desde 1941, la cual afectó a 1,213 municipios de 19 entidades federativas (DOF, 2012). Mediante estos mapas históricos se puede determinar que la agricultura en el estado de Zacatecas se encuentra en constante riesgo de padecer sequía, ya que por lo menos en el 50% de los años analizados los cultivos de interés presentan una salud con tendencia al estrés hídrico ($VHI < 0.35$).

Igualmente, mediante la Figura 8 podemos analizar cuantitativamente el porcentaje de superficie agrícola afectada por sequía (ASI) a nivel municipal, tanto de eventos históricos como actuales. Tomando como referencia los años donde la salud de la vegetación fue más deficiente (1989, 1997, 2001 y 2011), mediante el índice ASI se determinó que, en 1989, 21 municipios del estado de Zacatecas presentaron más del 70% de área agrícola afectada por sequía; en 1997 fueron 30 municipios en esta condición; en 2001 fueron 28 municipios; y en 2011 fueron 25. Por lo menos en 40% de los años analizados (incluyendo lo que va de 2019), se ha presentado al menos un municipio con un porcentaje de superficie agrícola afectada por sequía entre 25 y 40%. Sólo el 8% de los años analizados presentan por lo menos un municipio con una superficie afectada por sequía mayor al 85%. En general, la zona en estudio presenta eventos frecuentes de sequía y en algunos casos de gran intensidad agudizados en la zona centro-norte del estado, que es donde se localizan las principales áreas agrícolas.

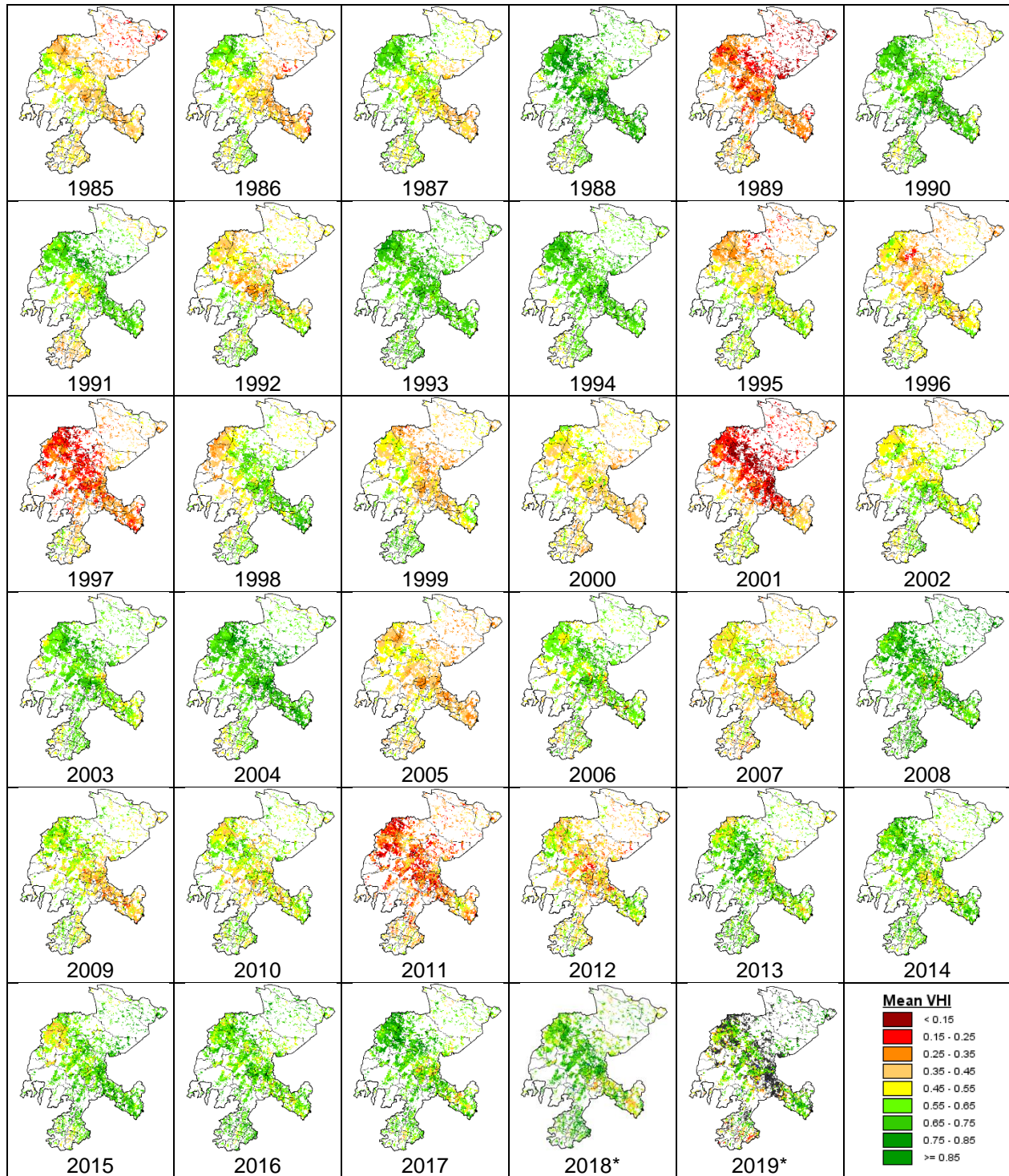


Figura 7. Valores medios anuales del VHI (μ VHI) para los cultivos seleccionados (1985-2019).

*Valor medio correspondiente a la segunda decena de julio del año respectivo (Los pixeles negros indican que no hay datos satelitales debido a la nubosidad). Fuente: elaboración propia con base en ASIS-País.

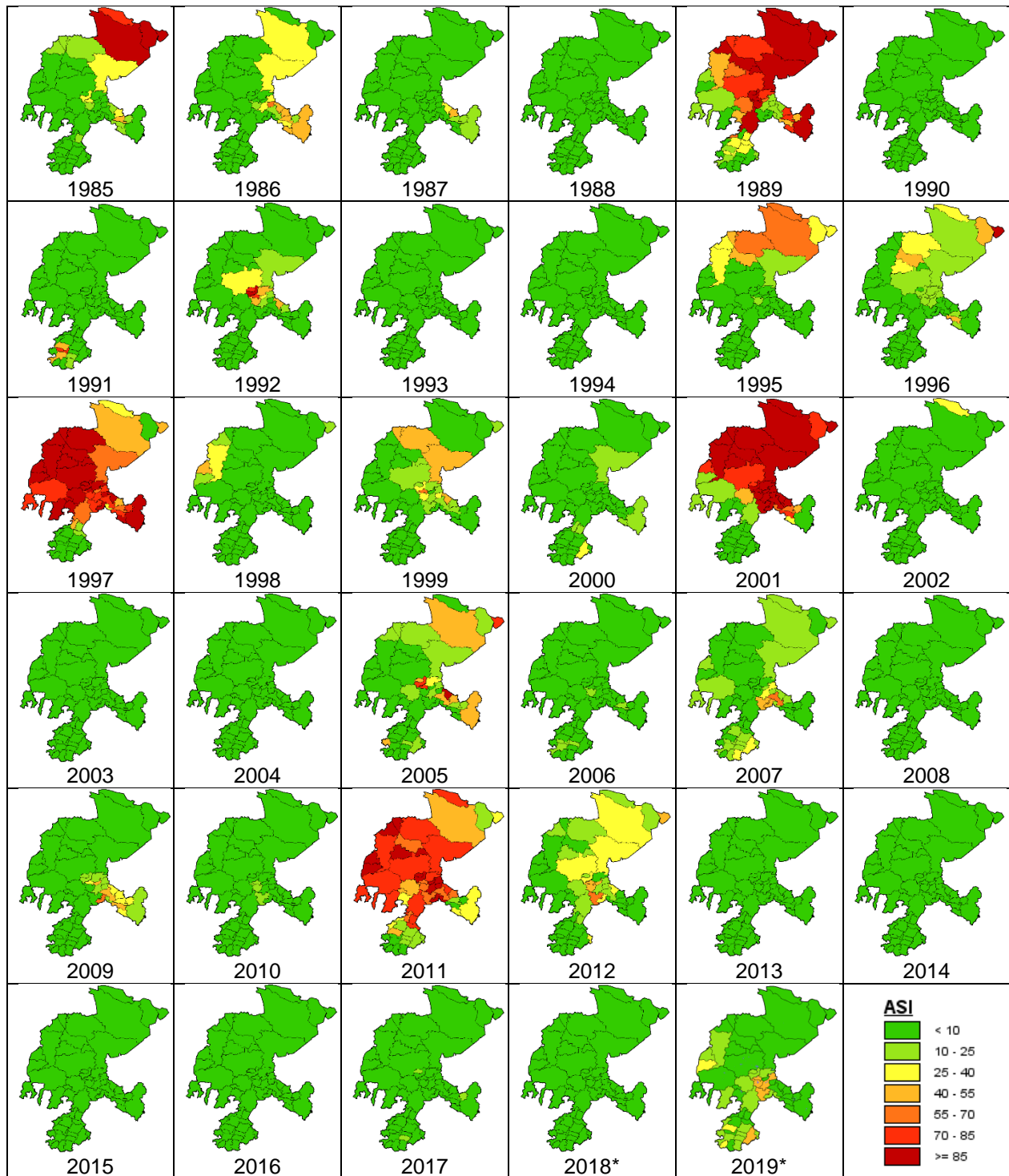
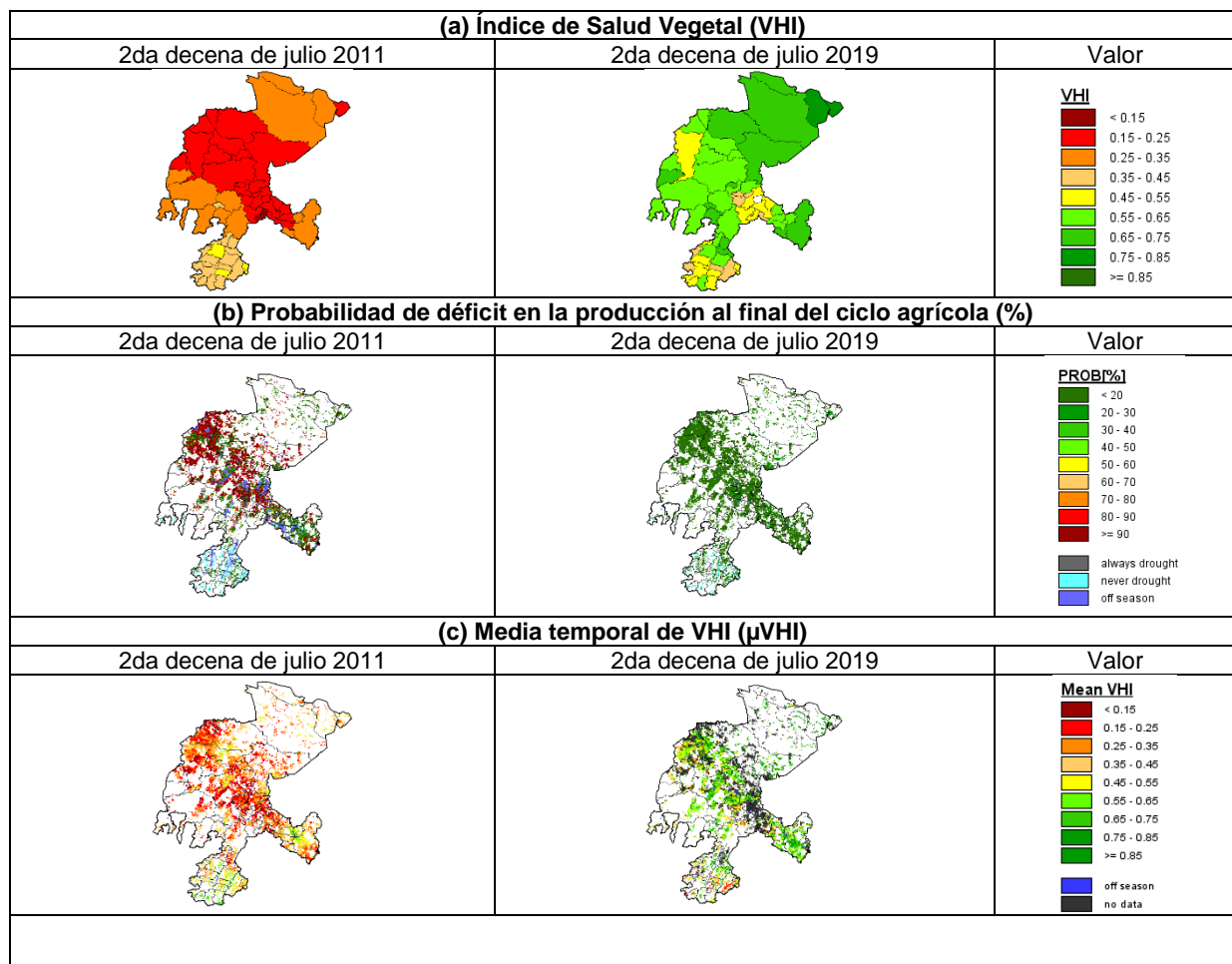


Figura 8. Evolución del porcentaje promedio de área afectada por sequía (ASI) en Zacatecas (1984-2019). *Valor medio de ASI correspondiente a la segunda decena de julio del año respectivo. Fuente: elaboración propia con base en ASIS-País.

En la **Figura 9** se muestran los productos principales de la herramienta ASIS-País: índice VHI, probabilidad de déficit en la producción al final del ciclo agrícola, media del VHI, Índice de Categorías de Sequía e Índice de Estrés Agrícola; para dos fechas específicas que son: la segunda decena de julio del 2011 (una de las más secas en los registros históricos) y la segunda decena de julio 2019 (la más reciente). Estas fechas se eligieron para realizar una comparativa de las condiciones que imperaban en un año seco (2011) y las actuales. En el inciso (a) se observan los valores medios por municipio del VHI para las fechas especificadas. De manera clara se observa que en 2011, más del 65% de los municipios presentaban un $VHI < 0.35$ (estrés hídrico), mientras que en el ciclo agrícola actual (2019), las condiciones son favorables para el desarrollo de los cultivos en análisis ($VHI > 0.35$) en el 60% de municipios del estado. En el inciso (b) se muestran las probabilidades de déficit en la producción. La probabilidad de déficit en los cultivos de la zona centro del estado en julio 2011 era mayor al 90%, escenario opuesto a la probabilidad de déficit del ciclo agrícola actual que es menor al 20%. En el inciso (c) y (d) se muestran los mapas con la componente temporal del VHI (μVHI , promedio de los valores de VHI por pixel en el tiempo) y la componente espacial ($\mu^* VHI$, promedio de los valores de μVHI de cada pixel en una región administrativa), respectivamente, mediante los cuales se calcula el índice ASI -inciso (e)-, el cual muestra claramente la diferencia entre las condiciones de sequía en julio de 2011 con respecto a julio de 2019.



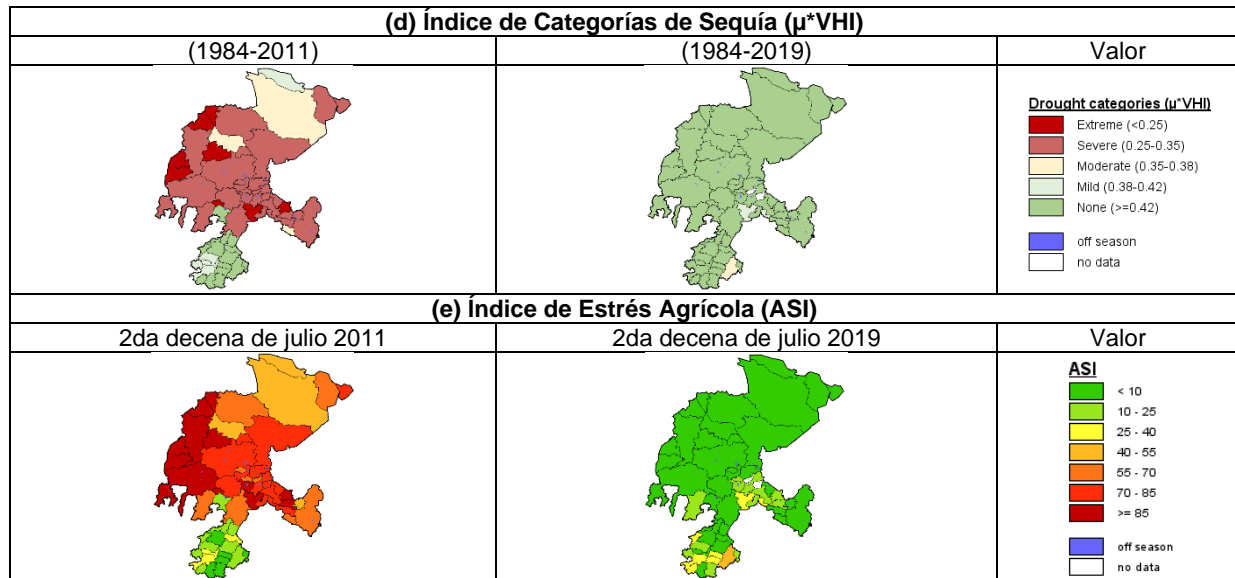


Figura 9. Comparación de mapas de índices de sequía correspondientes a la segunda decena de julio de 2011 y la segunda decena de julio de 2019. Fuente: elaboración propia con base en ASIS-País.

En la Figura 10 se presentan las curvas de la relación entre el porcentaje de superficie agrícola afectada por sequía (valor del ASI, eje de las abscisas) y su probabilidad de ocurrencia histórica (eje de las ordenadas), de algunos municipios localizados en diferentes latitudes del estado de Zacatecas. De manera general, en estas curvas se puede observar que la probabilidad de sequía agrícola decrece cuanto mayor es el valor de ASI, es decir, es mucho más probable que el área agrícola afectada por sequía en los municipios sea igual o inferior al 10%. Sin embargo, se observa que algunos municipios tienen mayor probabilidad de ser afectados que otros, sobre todo los que se ubican en el norte y centro del estado (Mazapil, El Salvador, Sombrerete, Villa de Cos y Valparaíso), donde hay probabilidad -aunque sea baja- de que más del 50% de la superficie sea afectada por sequía, llegando en algunos casos hasta el 90%. En contraste con los municipios del sur (Momax, Nochistlán de Mejía y Mezquital del Oro), donde se aprecia que es prácticamente nula la probabilidad de que el área agrícola afectada por sequía sea superior al 20 ó 30%. Lo anterior se vincula de manera directa con la variación de la precipitación en el estado, debido a que en el norte se registra una precipitación media anual entre 200 y 400 mm, mientras que en la zona centro entre 400 y 600 mm, y en la zona sur del estado se encuentra entre 700 y 800 mm (INEGI, 2017).

Finalmente, en la Figura 11 se muestran mapas de la probabilidad de ocurrencia de sequía en el cultivo de maíz de temporal a nivel municipal con umbrales definidos de ASI (>20%, >30% y >50%), mediante los cuales se visualizan de manera rápida aquellos municipios con probabilidad de que experimenten un área afectada superior a los valores de ASI establecidos. En los tres casos se observa que las áreas del cultivo de maíz de temporal localizadas en el sur del estado reflejan una probabilidad de ocurrencia de sequía por debajo de 10%, en la zona centro del estado se manifiesta en los tres casos una probabilidad de sequía entre el 10 y 20%, y en la zona norte entre el 20 y 30%, lo cual coincide plenamente con lo descrito en el párrafo anterior.

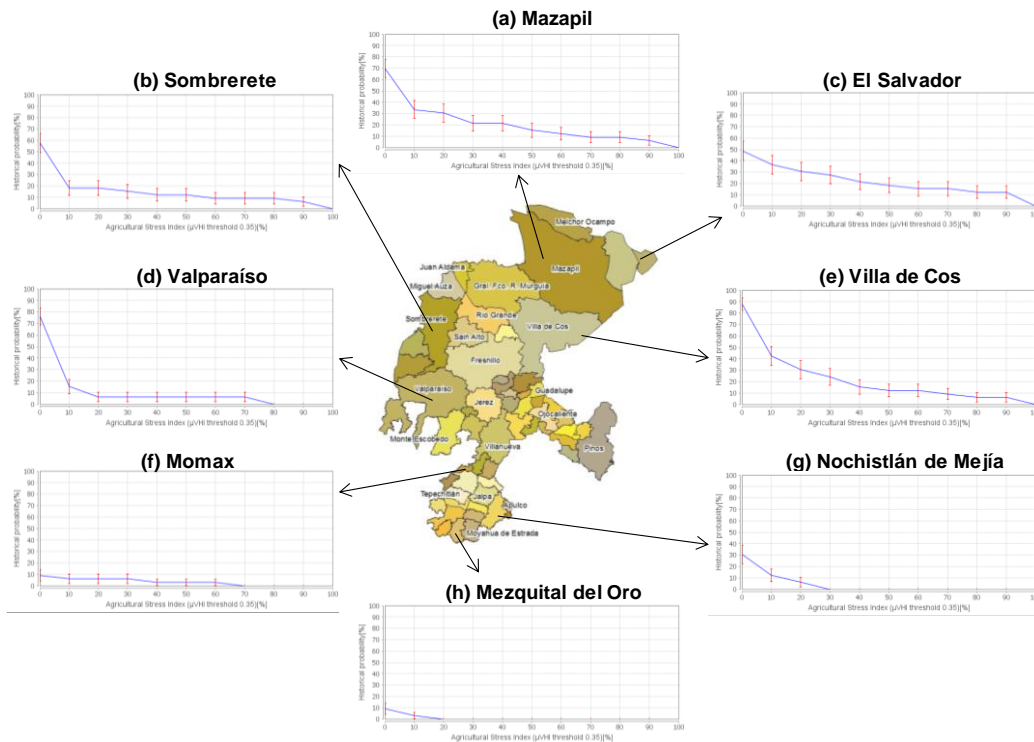


Figura 10. Curvas de probabilidad de sequía agrícola en diferentes municipios de Zacatecas. Fuente: elaboración propia con base en ASIS-País.

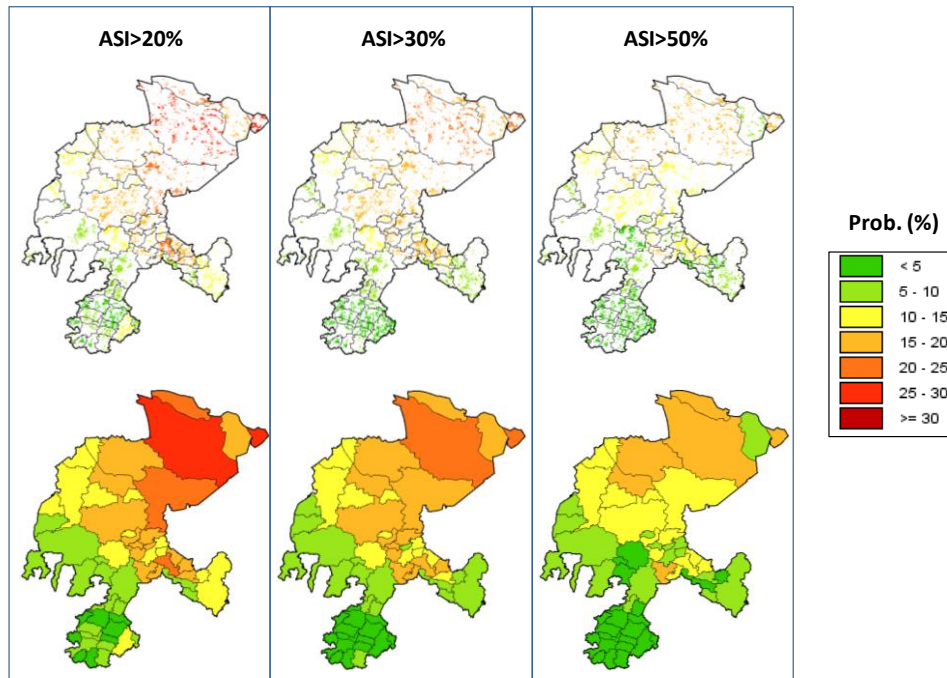


Figura 11. Probabilidad de afectación por sequía en cultivos de maíz de temporal para umbrales definidos de ASI. Fuente: elaboración propia con base en ASIS-País.



Conclusiones

El monitoreo y la previsión probabilística de la sequía en la agricultura constituyen dos elementos fundamentales para la gestión del riesgo, que sirven como detonadores para la implementación de medidas preventivas y de mitigación. En las últimas décadas, como una alternativa a la escasez o ausencia de información climatológica registrada en campo, se ha intensificado el uso de técnicas de teledetección e imágenes de satélite que permiten conocer el estado de salud de la vegetación, lo cual a su vez ha sido bastante útil para determinar el impacto de fenómenos climatológicos como la sequía en la agricultura.

La herramienta ASIS-País, calibrada con información de terreno a nivel nacional (mapas de uso actual del suelo, fechas de siembra, duración del ciclo del cultivo y coeficientes de cultivo), permite detectar con mayor precisión que los monitores convencionales (como el MSM) los periodos de estrés hídrico, identificando las unidades administrativas que presentan mayor probabilidad de ocurrencia de sequía. Los resultados se presentan a través de mapas de fácil interpretación para los tomadores de decisiones, a fin de que se implementen a tiempo las medidas conducentes a prevenir y mitigar los efectos del fenómeno.

Específicamente, en el área de estudio del presente trabajo, es decir, en el estado de Zacatecas, la herramienta ASIS-País ha permitido detectar aquellas áreas agrícolas y municipios donde es más probable que ocurra afectación por sequía, con base en los registros históricos de los últimos 35 años. Los municipios del norte y centro del estado, donde se ubican las principales zonas de cultivo de frijol y maíz, son las más propensas a padecer este fenómeno. Igualmente, como parte del monitoreo en tiempo cuasi-real que se realiza a través de ASIS-País, es posible conocer la probabilidad de déficit en la producción al final del presente ciclo agrícola (primavera-verano 2019), la cual es menor al 20% en la mayor parte del estado, pues en general se han registrado lluvias superiores a la normal en todo el centro-norte del país. Es importante que tanto la herramienta ASIS-País como los resultados de este trabajo, se difundan entre los tomadores de decisiones y los responsables de formular políticas públicas en las distintas dependencias federales y estatales (SADER, CONAGUA, etc.).

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento otorgado para la realización de este trabajo a través del proyecto de investigación PDCPN-2017/4924 del Programa de Proyectos de Desarrollo Científico para atender Problemas Nacionales. Y a la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), por el soporte técnico, la información y capacitación brindadas.

Referencias

CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). (2012). *Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2011*. Secretaría de Gobernación. México, D.F. 403 pp.



- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2012). ACUERDO por el que se instruyen acciones para mitigar los efectos de la sequía que atraviesan diversas entidades federativas. Disponible online: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5231010&fecha=25/01/2012
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO Riego y Drenaje No. 56. Roma, Italia.
- _____. (2015a). *The impact of disasters on agriculture and food security*. Disponible online: www.fao.org/3/a-i5128e.pdf
- _____. (2015b). *ASIS-País: Sistema de vigilancia de la sequía agrícola*. Folleto informativo. Ciudad de Panamá. FAO. 8 pp.
- Hernández, T. (2018a). *Manual de usuario del Sistema del Índice de Sequía Agrícola / ASIS País. Módulo I. Preparación de datos geográficos para ASIS País*. Ciudad de Panamá. FAO. 73 pp.
- Hernández, T. (2018b). *Manual de usuario del Sistema del Índice de Sequía Agrícola / ASIS País. Módulo II. Ejecución de la herramienta ASIS País*. Ciudad de Panamá. FAO. 77 pp.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2006). Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Precipitación media anual. Disponible online: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267544>
- _____. (2013). *El cultivo del frijol en Zacatecas: Censo Agropecuario 2007*. Aguascalientes: INEGI.
- _____. (2018). Marco Geoestadístico de los Estados Unidos Mexicanos. Disponible online: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463674658>
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). (2017). *Agenda Técnica Agrícola: Zacatecas*. México: INIFAP.
- Kogan, F. (1994). Droughts of the late 1980's in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76(5), 655–668.
- Kogan, F. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15, 91–100.
- Kogan, F. (1997). Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 7(4), 621–636.
- Ortega-Gaucin, D. y Velasco, I. (2013). Aspectos socioeconómicos y ambientales de las sequías en México. *Aqua-LAC*, 5(2):78-90.
- Rojas, O., Vrieling, A. & Rembold, F. (2011). Assessing drought probability for agricultural areas in Africa with coarse resolution remote sensing imagery. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 343-352.
- Rojas, O. (2016). *Protocolo para el proceso de calibración y adaptación nacional de la herramienta ASIS-País*. Ciudad de Panamá, FAO. 9 pp.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2015). *Estimación de superficie agrícola de maíz, frijol, sorgo grano y trigo grano para el ciclo primavera-verano de Zacatecas*. Recuperado el 08 abril 2019 desde: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/estimacion-de-superficie-agricola-para-el-ciclo-primavera-verano>
- _____. (2019). *Estadística de Producción Agrícola (1984-2017)*. Recuperado el 23 mayo de 2019 desde: <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (2019). *Monitor de Sequía en México*. Disponible online: <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- Unganai, L., & Kogan, F. (1998). Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 63, 219–232.
- Van H., R., Eerens, H., Haesen, D., Royer, A., Bydekerke, L., Rojas, O., Li, Y. & Racionzer, P. (2016). FAO's AVHRR-based Agricultural Stress Index System (ASIS) for global drought monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 37:2, 418-439.