

El monitor de la sequía en México

• René Lobato-Sánchez* •

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*Autor para correspondencia

Resumen

Lobato-Sánchez, R. (septiembre-octubre, 2016). El monitor de la sequía en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5), 197-211.

Por su lenta evolución, la sequía es uno de los fenómenos naturales más costoso en cuanto a sus impactos. En 2002 se conformó un grupo de climatólogos de México, Estados Unidos y Canadá, para implementar el Monitor de Sequías para Norteamérica (NADM, por sus siglas en inglés). De esta iniciativa se adapta la metodología para elaborar el Monitor de Sequías de México (MSM). Las sequías se pueden clasificar por sus mecanismos físicos, por sus impactos o por una combinación de éstos; no existe una sola definición que integre todo el espectro a aplicaciones. La escala temporal y espacial de su evolución y magnitud requiere de los conceptos meteorológicos con información de lluvia y temperatura; agrícolas, con humedad de suelo y condiciones de salud de la vegetación; hidrológicos, en cuanto a condiciones de escurrimientos y embalses; y socioeconómicos, en la disponibilidad de bienes de consumo y dotación de agua a centros urbanos y hasta pequeñas comunidades. El MSM integra siete diferentes índices mediante un sistema de información geográfica; la experiencia del climatólogo con el consenso entre usuarios y especialistas la complementa. Además, se utiliza información histórica, enfatizando la calidad y oportunidad para un seguimiento objetivo y periódico, comparando con la actual en forma de índices y porcentajes con respecto a sus valores medios. El reto consiste en conjuntar toda esta información en un solo producto, con valores estandarizados que permitan determinar la magnitud de la sequía. El MSM es información básica para la atención de programas que tienen que ver con la gestión del agua.

Palabras clave: sequías, monitor, clima, precipitación, temperatura, humedad del suelo, evapotranspiración, índice.

Abstract

Lobato-Sánchez, R. (September-October, 2016). The Drought Monitor in Mexico. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 7(5), 197-211.

Because of its slow evolution and its impacts, drought is among the costliest natural phenomena. In 2002 a group of climatologists from Mexico, United States and Canada implemented the North American Drought Monitor (NADM), under such initiative the methodology was adapted to develop the Mexican Drought Monitor (MSM). Droughts may be classified by its physical mechanisms, by its impacts or a combination of both; there is no a single definition for fulfilling its entire spectra of applications. Temporal and spatial scale of drought evolution and magnitude required of the meteorological concepts with information of both rainfall and temperature; in agriculture, soil moisture and vegetation conditions are required; in hydrology with reservoir and stream flow conditions; and socioeconomic impacts in the availability of goods and water supply to all users. The MSM is constructed by using 7 different indices in layers blended through a Geographic Information System, it is complemented through the expertise of the climatologist along with the discussion and consensus among users and specialists. Historical information is a complement with the current in the form of indices and percentages with respect to its mean values, quality and timely data is required for a continuing and objective process. The challenge resides in collecting all the information in one single product with standardized units which allow the determination of its magnitude. The MSM is the basic input information for programs dealing with water management.

Keywords: Droughts, monitor, climate, temperature, precipitation, soil moisture, evapotranspiration, index.

Recibido: 18/08/2015

Aceptado: 04/02/2016

Introducción y objetivos

El contexto de la sequía, dependiendo de su extensión temporal y magnitud, tiene diversas implicaciones en algunos sectores preponderantes en la gestión del agua, como la agricultura. El

inicio de este proceso se debe a la falta de la precipitación que de forma regular ocurre durante la temporada de lluvias y que se puede manifestar tanto en magnitud como duración. Sin embargo, la complejidad del fenómeno se debe a que si bien inicia como una falta de precipitación dentro de

los rangos medios de la región en donde aparece, cuando esta falta de lluvia se prolonga, entonces se extiende manifestando sus impactos en los sectores agrícolas e hidrológicos en primer instancia y después afectando el entorno socioeconómico.

La sequía es un fenómeno complejo debido a su lento desenvolvimiento y sus impactos directos. Es común que las acciones de mitigación de sus impactos se implementen cuando se tiene el fenómeno en su máxima intensidad.

Por lo general, la forma de clasificar la evolución de la sequía es a través de cuatro etapas fundamentales: meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica. Cada una de ellas tiene un impacto y sus respectivas consecuencias (Wilhite & Glantz, 1985; American Meteorological Society, 1997). Encontrar una sola definición que considere el concepto de sequía es muy complejo debido a las necesidades de cada usuario; no existe una definición universal, pues está sujeta a las características de cada régimen climático y del impacto al sector específico (Wilhite, Svovoda, & Hayes, 2007). La que más se acerca al proceso de elaboración del MSM es una modificación a la presentada por Frick, Bode y Salas (1990): "Una sequía se define como un período sostenido de baja precipitación tal que el agua disponible de embalses, escurrimientos, acuíferos y fuentes externas no cumplen con las necesidades de los usuarios de la cuenca". Por otra parte, los impactos por sequías en la actualidad se vuelven muy complejos debido a que se pueden diversificar a otros sectores, como turismo, energía, transporte, salud, ecología y medio ambiente, entre otros (Wilhite *et al.*, 2007), que en etapas de máxima intensidad alcanzan a tener consecuencias sociales importantes; migración es una de ellas.

Los impactos por sequías se manifiestan de forma directa en la reducción de cosechas, pastizales y producción forestal; aumento del peligro de incendios; reducción en los niveles de embalses, ríos y acuíferos; incremento en la tasa de mortalidad de ganado y vida silvestre; daño a pesquerías y medio ambiente. Pero en la medida de su intensificación, la baja en cultivos, pastizales y producción forestal puede resultar

en una merma del ingreso de agricultores y agronegocios, desempleo, incremento del crimen, ejecución de hipotecas de préstamos hipotecarios, migración y programas de atención de desastres. Las pérdidas asociadas con impactos indirectos a menudo exceden a los provocados por impactos directos (Wilhite *et al.*, 2007).

El monitoreo de la sequía se ha convertido en parte integral de la planeación, preparación y mitigación a escalas local, regional e incluso nacional. Las sequías más recientes en México, desde que se implementó el MSM en 2003, describen que en forma relativamente frecuente, en alguna región del país se enfrenta un periodo de sequía; si bien, en general, las sequías aparecen con mayor frecuencia en las zonas áridas a semidesérticas, no están exentas de este fenómeno regiones semitropicales, como en el sur y sureste de México. Sólo considerando costos asociados con pérdidas en el sector agrícola, definidos por los Programas para Atender Contingencias Climatológicas (PACC), manejados por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa) e implementados por el Fondo de Desastres Naturales (Fonden), de acuerdo con los datos obtenidos de los reportes de evaluación del impacto socioeconómico de los principales desastres naturales ocurridos en la república mexicana de los años 2001 a 2012 del Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred), se estima que la sequía ocurrida en 2011, con base en los registros del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), fue una de las más intensas de los últimos 70 años y tuvo un costo de 7 750 millones de pesos (MDP) (figura 1). Otros impactos relacionados se refieren a la distribución del agua para consumo humano, donde las zonas urbanas, como la Ciudad de México y su zona conurbada, requieren de recortes en la dotación para cubrir los meses de mayor demanda.

El MSM no es un sistema de pronóstico. Su objetivo principal es describir la evolución de las sequías en magnitud y extensión espacial, en conjunto con sus impactos, principalmente en los sectores agropecuario e hídrico. Permite además evaluar las condiciones actuales y un poco en el pasado (retrospectiva), considerando

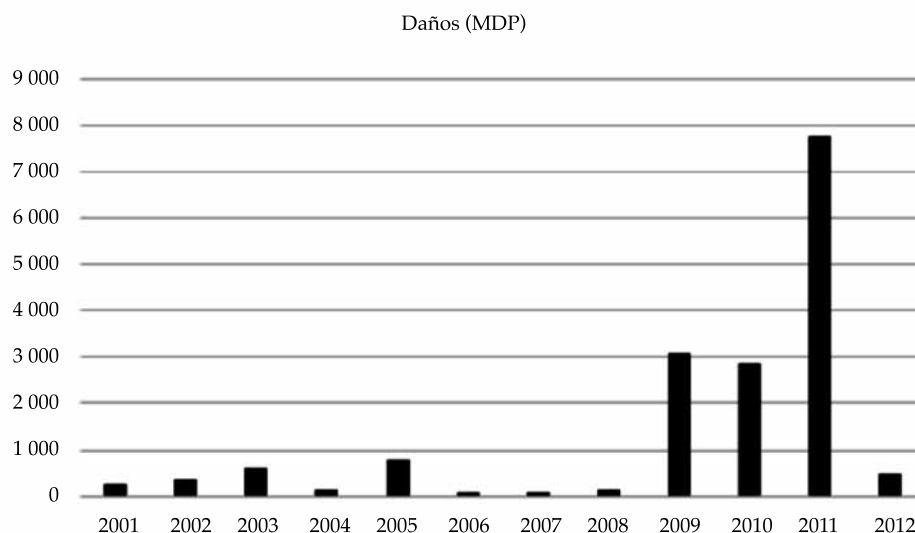


Figura 1. Relación de costos por sequía, considerando sólo los impactos en el sector agropecuario.

escalas lo más entendibles y accesibles para todo tipo de usuarios, desde expertos y tomadores de decisiones hasta usuarios y público en general, y medios de comunicación.

El MSM es una extensión del trabajo que se realiza en Norteamérica. A partir de 2002, México se incorporó al trabajo regional que se venía desarrollando tanto en Estados Unidos como en Canadá. Expertos en sequías de México, Estados Unidos y Canadá se reunieron por primera ocasión en un esfuerzo por mejorar el monitoreo y la evaluación de los extremos climáticos en el Centro Nacional de Datos Climáticos de la NOAA, en Carolina del Norte, EUA, para desarrollar el plan de un nuevo programa de monitoreo de sequía para Norteamérica (Lawrimore, Heim Jr., Svoboda, Swail, & Englehart, 2002). Producto de esta colaboración se implementa el Monitor de Sequías para Norteamérica (NADM, por sus siglas en inglés).

La metodología para su elaboración en México es similar a la de EUA y Canadá, solamente que algunos insumos se incorporan de forma manual y su análisis depende de la habilidad del climatólogo. Aunque al inicio se consideró como un producto experimental, a medida que el fenómeno de la sequía ha cobrado mayor relevancia, se utiliza ahora para fines de planeación,

toma de decisiones y aplicación de programas para reducir la vulnerabilidad en la sociedad en general y su desarrollo.

Una forma muy clara del concepto del monitor de sequía lo describen Svoboda *et al.* (2002): “La determinación de la magnitud de la sequía a tiempo real puede ser tan complicada como su definición misma. No sólo la sequía es discutiblemente diferenciable de otros fenómenos naturales debido a sus diversos y muchos impactos, sino que también es medida por su extensión espacial, intensidad, magnitud y duración”. El reto que se tiene en forma constante es que todas estas propiedades deben ser tomadas en cuenta en entender y reflejar el fenómeno mismo de la sequía y sus impactos en un solo mapa.

El problema viene de la subjetividad con la que se elabora el MSM, pues incorporar información con diferentes escalas y unidades, por ejemplo, la combinación de índices, como el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés), Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDI, por sus siglas en inglés), con anomalías de precipitación y valores estadísticos de lluvia y temperaturas (estos últimos generalmente definidos en percentiles), llevan a crear un concepto subjetivo que es donde la

experiencia del climatólogo experto en sequías permite conjuntar en un solo producto. El MSM consiste de un mapa que describe las regiones del país que experimentan alguna condición de sequía y se acompaña por una narrativa donde se describen fundamentalmente sus impactos. El cuadro 1 describe las categorías de las magnitudes de las sequías empleadas en el MSM, donde cada categoría está asociada con la probabilidad de ocurrencia del percentil para un periodo de retorno de 100 años.

Aunqu la condición D0 no es propiamente una condición de sequía, se considera debido a que por lo general antecede a la aparición formal o bien impactos prolongados posteriores a la sequía.

A diferencia de Estados Unidos, donde la elaboración del Monitor de Sequías se realiza en forma rotatoria por instituciones como NDMC, USDA, CPC y NCDC (Svoboda *et al.*, 2002), el Monitor de Sequías se elabora en México sólo por el SMN y se publica de manera quincenal (http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=20&Itemid=74).

Una forma común de evaluar una sequía es a través del uso del SPI y PDSI; sin embargo, estas medidas solamente atienden el concepto de sequía meteorológica (precipitación) y agrícola (humedad de suelo y evapotranspiración), respectivamente.

Metodología

Similar al NADM, el MSM está compuesto de una serie de diferentes indicadores, modelos y datos en diversas unidades con escalas espacia-

les y temporales, la única diferencia radica en que no se emplea el sistema objetivo de combinación de indicadores OBDI (Svoboda *et al.*, 2002), en su lugar procede una combinación subjetiva que depende en mayor medida de la experiencia del climatólogo y de la información con la que cuenta. A continuación se describe el procedimiento de elaboración del MSM.

El insumo más importante es la precipitación, por ello se pone especial atención a la red de estaciones que cuente con datos que contengan el nivel de confiabilidad, calidad y periodicidad aceptable de acuerdo con las normas establecidas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Se trata de un grupo selecto de estaciones climáticas con la calidad requerida y que en la actualidad cuenta con 358 sitios, con una distribución no uniforme dentro del país. La figura 2 describe la ubicación de las estaciones que conforman esta red, donde se aprecian regiones con suficiente cobertura espacial, así como otras donde es necesario reforzar la medición. Dentro de la escala climática, se emplea el concepto de anomalía, que se refiere al valor observado, comparado con su valor normal, referido para el caso del MSM en una escala porcentual (figura 3); el mapa de los últimos 30 días es importante, pues de éste se observa la ocurrencia de la precipitación, comparada con su valor de referencia (normal) y sirve para observar el régimen pluvial en función de un umbral de referencia (normal climatológica) en esta escala temporal, siguiendo a éste los mapas de 90, 180 y 365 días, que sirven también para observar el régimen pluvial a mediano y largo plazos, para determinar impactos principalmente en el sector hídrico y agrícola.

Cuadro 1. Clasificación de la sequía de acuerdo con sus condiciones y probabilidades.

Categoría	Condición de sequía	Probabilidad en percentil
D0	Anormalmente seco	20 a ≤ 30
D1	Sequía moderada	10 a ≤ 20
D2	Sequía severa	5 a ≤ 10
D3	Sequía extrema	2 a ≤ 5
D4	Sequía excepcional	≤ 2

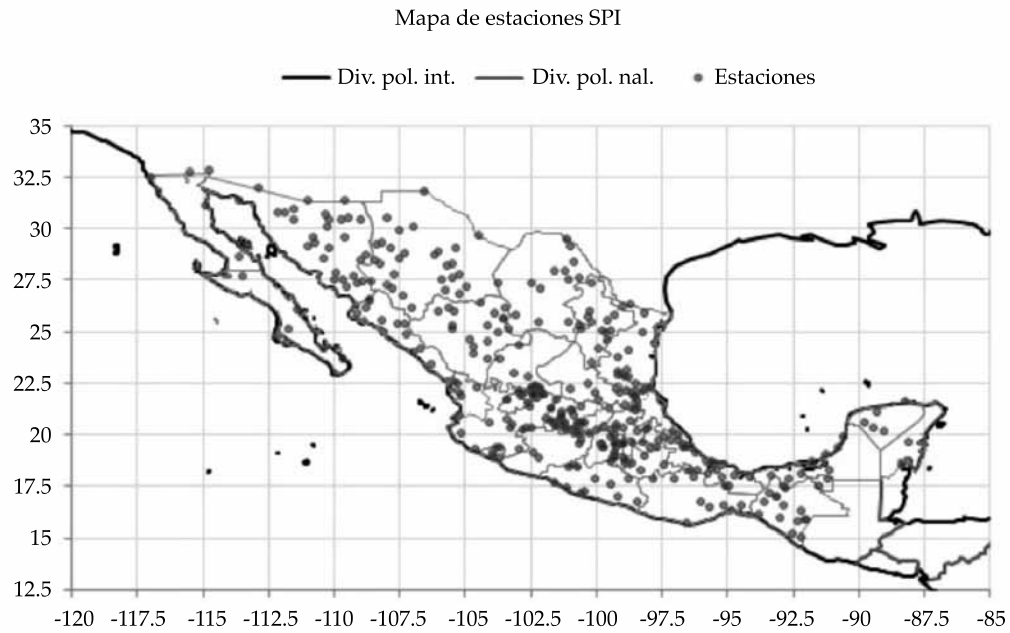


Figura 2. Red climática para elaboración del SPI.

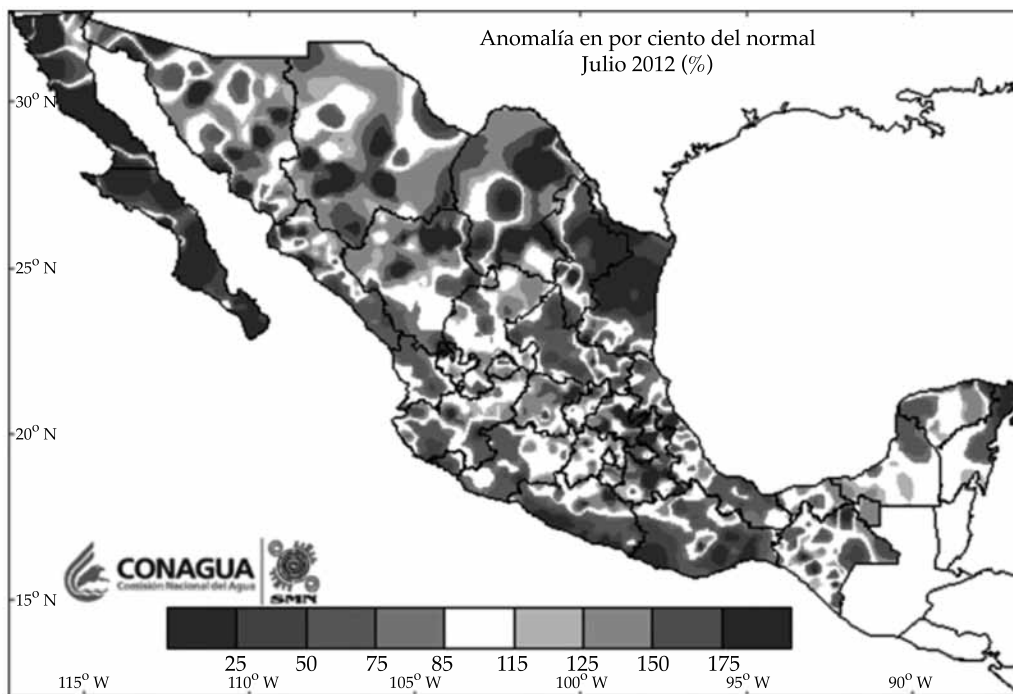


Figura 3. Ejemplo de mapa en porcentaje de precipitación.

Los datos de precipitación sirven para elaborar los mapas del SPI, un valor muy recurrido para estimar condiciones de sequía. En diversos esquemas de seguimiento de sequías, éste se ha considerado como el insumo principal para implementar sistemas de alerta temprana por sequías, incluso se ha utilizado como un elemento de pronóstico, extendiendo el SPI a partir del pronóstico climático. Dentro de las cuatro fases en las que regularmente se enmarca la sequía, el SPI muestra las condiciones de la precipitación, por lo que es utilizado para monitorear sequías meteorológicas; ésta es una de las razones por la que se han hecho propuestas de otros indicadores, considerándolos en forma única o aislada hasta combinados (Heim Jr., 2002; Hao & Aghakouchak, 2014).

El SPI es una herramienta de uso común para el monitoreo de la sequía. Un ejemplo es el presentado por McRoberts y Nielsen-Gammon (2012), donde utiliza el SPI expresado a una alta resolución espacial para el monitoreo y evaluación de la sequía. La funcionalidad radica en la estandarización de la información pluviométrica, aunque es posible aplicar el mismo método con otras variables (p. ej., humedad de suelo y escurrimientos, entre otros) o incluso de manera combinada (Hao & Aghakouchak, 2013). El método se refiere a considerar un valor que representa el número de desviaciones estándar de la precipitación ocurrida a lo largo del periodo de acumulación de que se trate (1, 3, 6, 9, 12 o más meses) respecto de la media, una vez que la distribución original de la precipitación ha sido transformada a una distribución normal (Mckee, Doesken, & Kleist, 1993). EL SPI ha sido definido por la OMM como la herramienta estándar para el monitoreo de la sequía.

La forma en cómo se elabora el SPI es tomando como base datos climáticos mensuales, lluvia acumulada mensual en este caso, y se prepara para un periodo deseado de m meses, idealmente con un periodo continuo de cuando menos 30 años. Se elige un subgrupo de valores promedio para determinar las escalas temporales en periodos de i meses, donde i es 1, 2, 6, 12, 24 o hasta 48 meses. El grupo de datos

se desplaza en el sentido de que cada mes un nuevo valor es determinado de los meses i previos. Cada uno de estos datos se ajusta a una función gamma para definir su probabilidad de precipitación. Una vez que la relación de probabilidad de precipitación se establece de los registros históricos, la probabilidad de cualquier dato de precipitación es calculado y utilizado junto con una estimación de la normal inversa para calcular la desviación de la precipitación para una densidad de probabilidad distribuida con valor de media cero y desviación estándar de uno. Este valor es el SPI para un punto particular de lluvia. La figura 4 muestra un mapa del SPI, cuyas unidades coinciden con la definición acordada para el MSM y NADM.

La temperatura a nivel nacional es la segunda variable observada, que de la misma forma que la precipitación, se maneja en términos de umbrales, considerando los valores de temperatura máxima, mínima y media, y sus correspondientes anomalías. Valores altos de temperatura conducen a un estrés hídrico e impacta de forma directa en la vegetación y condición de humedad de suelo. La figura 5 muestra a manera de ejemplo la distribución espacial de la anomalía de la temperatura media.

En uno de los primeros esfuerzos por contar con una herramienta que permitiera estimar la magnitud de las sequías que impactan en la agricultura, se desarrolló el índice de Palmer. En general, se refiere a los tres índices que regularmente se conocen: índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI/PDI, por sus siglas en inglés); índice de sequía hidrológica de Palmer (PHDI), y el índice Z (Robeson, 2008). Se utiliza para estimar la duración e intensidad de las sequías de largo periodo. Su naturaleza acumulativa permite conocer las condiciones prevalecientes de las sequías más aquellos de los meses previos. Para su cálculo se requiere de series de tiempo largas de cinco parámetros: precipitación; evapotranspiración; pérdida y recarga de humedad de suelo (incluyendo el contenido de agua en la planta), y escorrentía. La disponibilidad de toda esta información en el trabajo diario hace complicado su cálculo; por

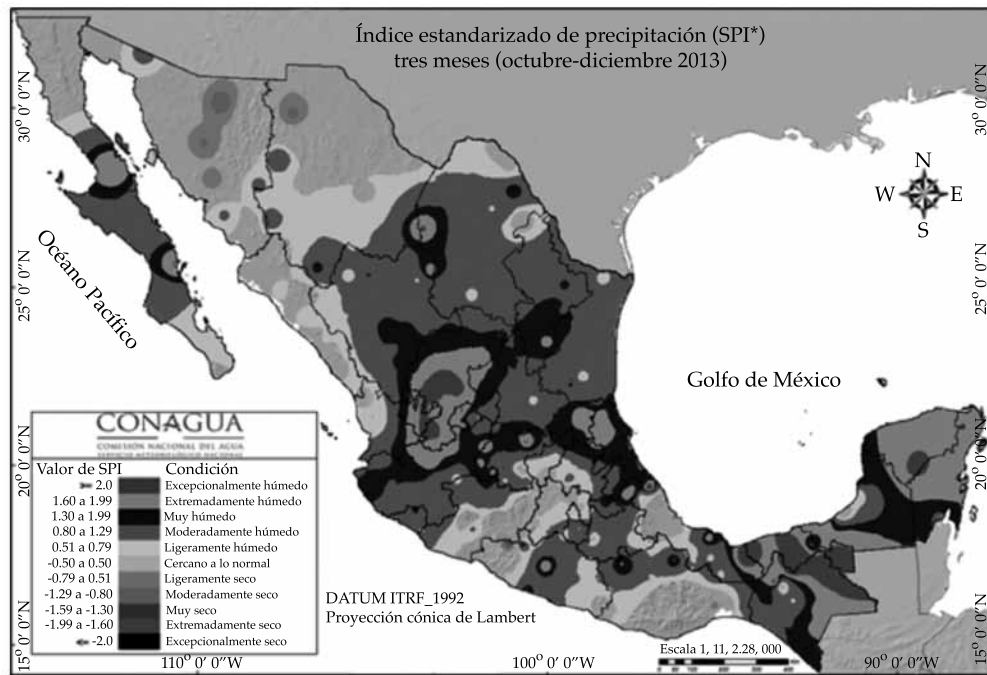


Figura 4. Ejemplo de mapa de índice estandarizado de precipitación a tres meses. Se emplea en particular para la detección y seguimiento de las sequías meteorológicas.

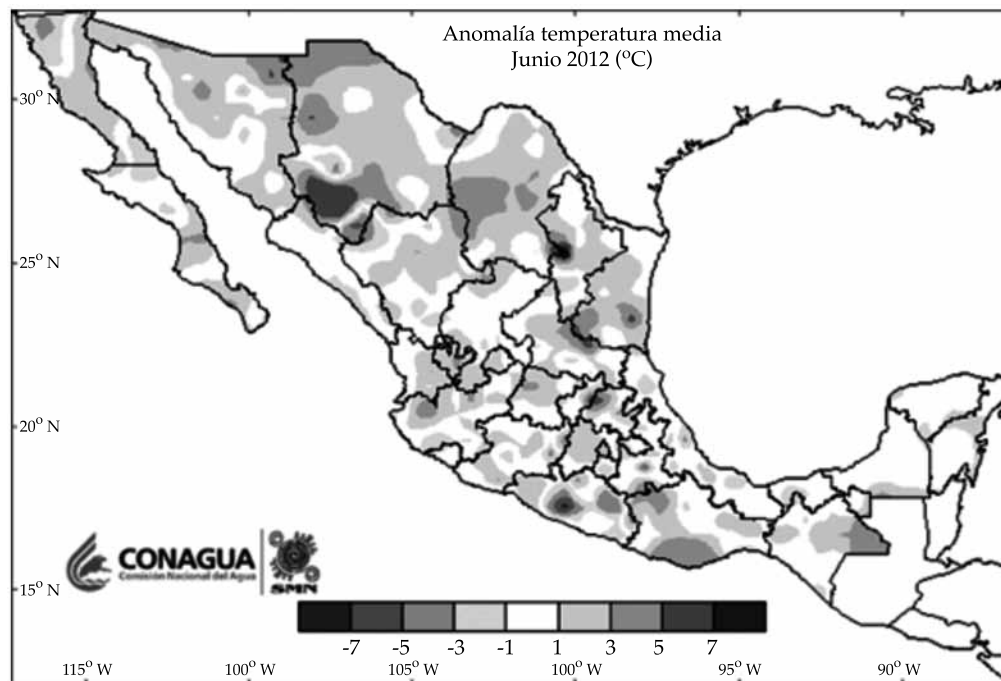


Figura 5. Ejemplo de mapa de anomalías de temperatura media para el mes de junio de 2012.

lo regular se estiman de manera indirecta las condiciones de evapotranspiración y humedad del suelo.

El cálculo del índice de sequía de Palmer se puede resumir como sigue: se obtienen los valores históricos, actuales y esperados de los primeros cuatro parámetros, preferentemente en escalas mensuales; se calculan los coeficientes dividiendo las cantidades medias observadas contra las esperadas; con estos coeficientes y las series de tiempo se determina la cantidad de humedad “normal” de cada mes mediante la ecuación de balance hídrico, considerando que la precipitación es función del escurrimiento, flujo que rebasa la zona de la raíz de la planta, evapotranspiración, contenido de agua en la planta y suelo; y se calcula la desviación de la precipitación actual contra la precipitación considerada como “condiciones existentes climatológicamente apropiadas”, convirtiendo estas desviaciones a índices de anomalía de humedad, mejor conocido como el índice Z de Palmer (Weber & Nkemdirim, 1998).

La forma recursiva del cálculo del índice de Palmer limita su uso para el seguimiento a tiempo real, pues es complicado saber los inicios de los periodos húmedos o secos con anticipación. Una adaptación considera la incorporación del factor de probabilidad; así, el PDSI (figura 6) se calcula mediante la suma de los periodos secos y húmedos posteriores a su ponderación por sus probabilidades (Weber & Nkemdirim, 1998; Robeson, 2008), expresando el inicio y fin de una sequía (o periodos húmedos), en términos de la probabilidad de que este periodo inicie o concluya.

El monitoreo satelital permite, bajo ciertas condiciones, observar la superficie terrestre y los procesos que ocurren en ésta. La vegetación responde rápidamente a las condiciones de humedad del suelo y temperatura; la observación por satélite permite observar tales cambios cubriendo grandes extensiones y a una resolución temporal muy corta. El índice de salud vegetal (VHI, por sus siglas en inglés) está compuesto por el índice de condición de vegetación (VCI, por sus siglas en inglés) y por

el índice de condición de temperatura (TCI, por sus siglas en inglés), donde un coeficiente define la contribución de cada uno de éstos y se utiliza para el monitoreo de sequías, así como para determinar las condiciones de los cultivos en el corto plazo; Anderson *et al.* (2013) recomiendan una ponderación equivalente para TCI y VCI, suponiendo que la contribución de estos índices es la misma. Para fines prácticos, un valor del VHI por arriba de 60 indica condiciones favorables para la agricultura. Kogan (1997) describe esta aplicación global para la detección de sequías y su monitoreo mediante la combinación de VCI-TCI y que se resume en el VHI, cuya información se obtiene de los sensores AVHRR en los canales visible, infrarrojo cercano e infrarrojo, instalados en los satélites de órbita polar de la NOAA. A partir de 1980, la información obtenida por el VHI, y derivado de su calidad y temporalidad, se ha vuelto indispensable para el seguimiento de condiciones de vegetación a tiempo real y el impacto del clima. La figura 7 muestra el índice de salud de la vegetación para México, que puede ser obtenido de la siguiente liga: <http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/index.php>, así como una serie de tiempo (figura 8), con valores promedio para el estado de Sonora desde 1980 hasta la fecha. Esta serie de VHI se puede obtener para las demás entidades del país.

Con datos de poco más de 20 años de los sensores AVHRR instalados en los satélites de órbita polar de la NOAA, se ha podido establecer un umbral de condiciones normales de vegetación a partir de valores inferidos por emisiones de energía electromagnética en las bandas visible e infrarroja. El principio del cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) depende de la medición de los valores de la reflectancia emitida por sus componentes en la superficie terrestre y en especial por la cobertura vegetal, separándola de aquella que es absorbida. Esta información se utiliza para determinar condiciones específicas, comparando con valores estadísticos de largo plazo. La percepción remota satelital permite, entre otras cosas, cuantificar qué fracción de la

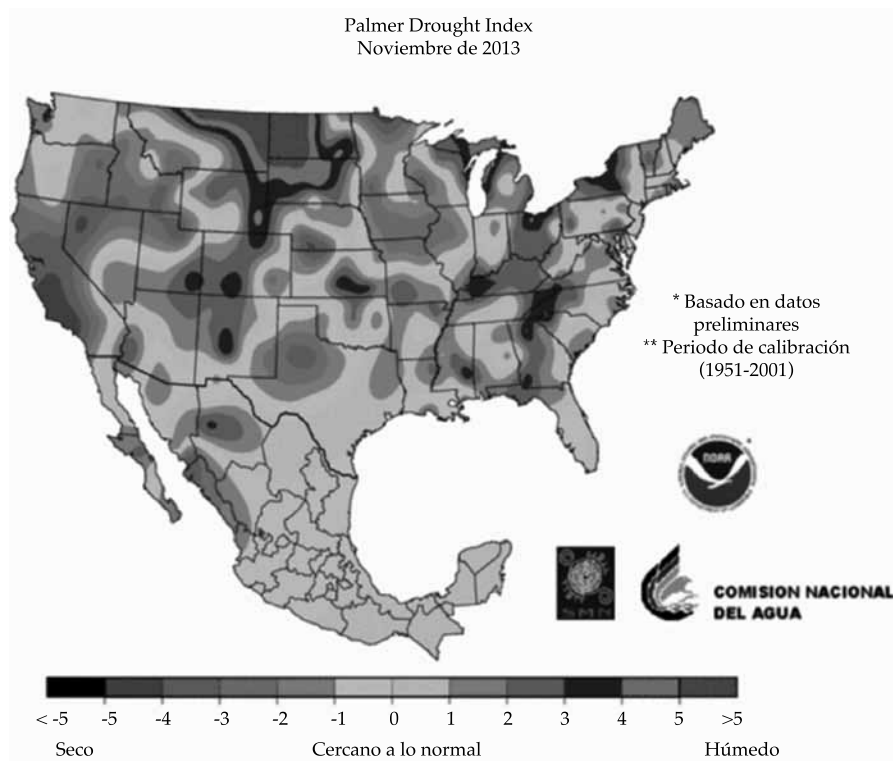


Figura 6. Mapa del índice de sequía de Palmer, producto elaborado en colaboración con el CPC de la NOAA a través del NADM.

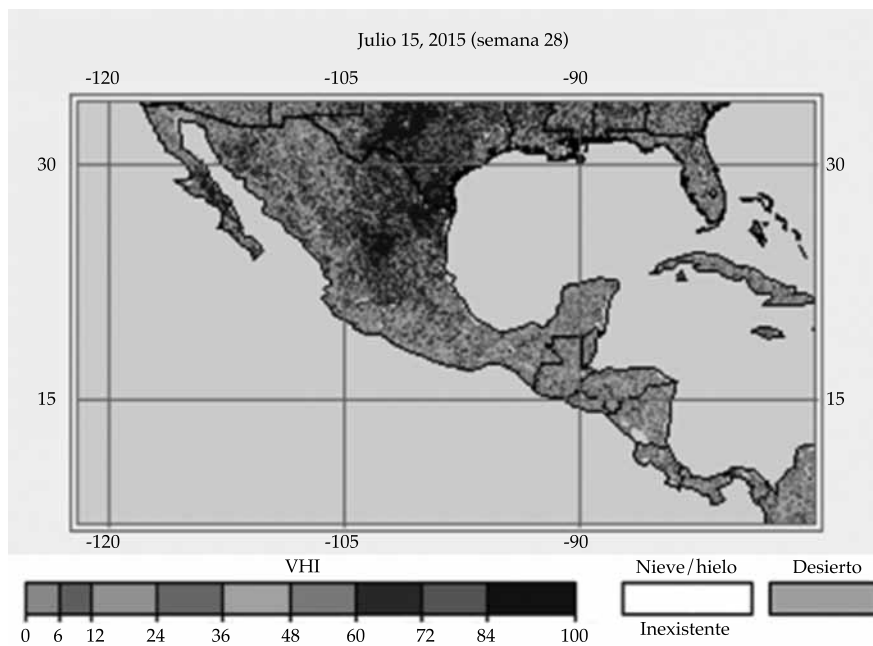


Figura 7. Ejemplo de mapa de índice de salud vegetal.

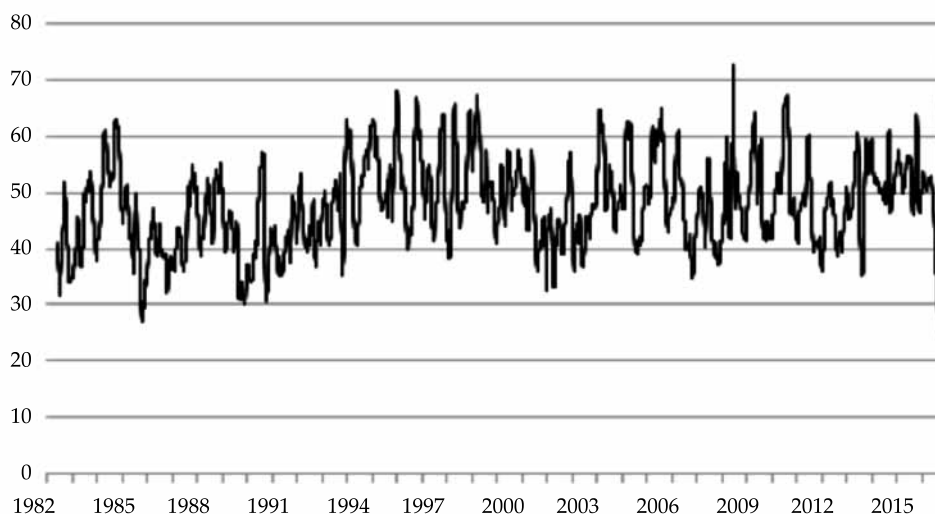


Figura 8. Condición del índice de salud vegetal para el estado de Sonora.

radiación fotosintéticamente activa es absorbida por la vegetación. De esta acción se puede determinar la condición de la vegetación, pues existe una relación directa entre la condición de la vegetación y su capacidad de absorción, y por lo tanto su productividad. Así, pueden utilizarse regiones de reflexión y absorción de radiación fotosintéticamente activa sobre un periodo de tiempo para caracterizar la salud de la vegetación en función de su valor normal. Una manera para cuantificar la condición de desarrollo de la vegetación es mediante la diferencia normalizada de la radiación infrarroja cercana y la radiación visible (figura 9). Su interpretación depende del valor del NDVI estimado. Por ejemplo, una vegetación que muestra una buena condición de desarrollo implica que contiene humedad de suelo aceptable y alta correlación en cuanto a densidad, por lo que sus valores serían los más altos; por otro lado, un suelo descubierto y con poca vegetación en condiciones de estrés muestra valores más bajos.

La condición antecedente de la humedad de suelo es un factor relevante que influye en las condiciones atmosféricas actuales y futuras; en interacción con la radiación solar determina la partición entre los flujos de calor latente y

sensible, que son factores preponderantes en la formación de tormentas de tipo convectivo.

Una forma práctica de estimar las condiciones de humedad de suelo es mediante el uso de modelos. Un modelo conceptual utilizado en forma operativa es el Leaky Bucket (cubo filtrante), que determina las condiciones hidrológicas de humedad antecedente en la superficie. Su hipótesis se basa en que la humedad contenida en el suelo, hasta cierta profundidad, puede cambiar la partición de la radiación entrante entre los flujos de calor entrante y saliente, y así conocer las condiciones iniciales de la humedad del suelo, que pueden utilizarse como predictores útiles para la temperatura y precipitación en el corto plazo. La humedad del suelo se calcula mediante un balance de contenido de agua en el suelo, considerando como información de entrada a la precipitación, evaporación, escurrimiento superficial y pérdidas por flujo subterráneo, que por lo general ocurre en los primeros dos metros de la superficie terrestre. Éste fue el primer intento por construir una serie de tiempo larga (1931-1993) en los Estados Unidos de humedad de suelo con un modelo de una capa (Huang, Van den Dool, & Georgakakos, 1996). Aunque, en general, el modelo de contenido de humedad

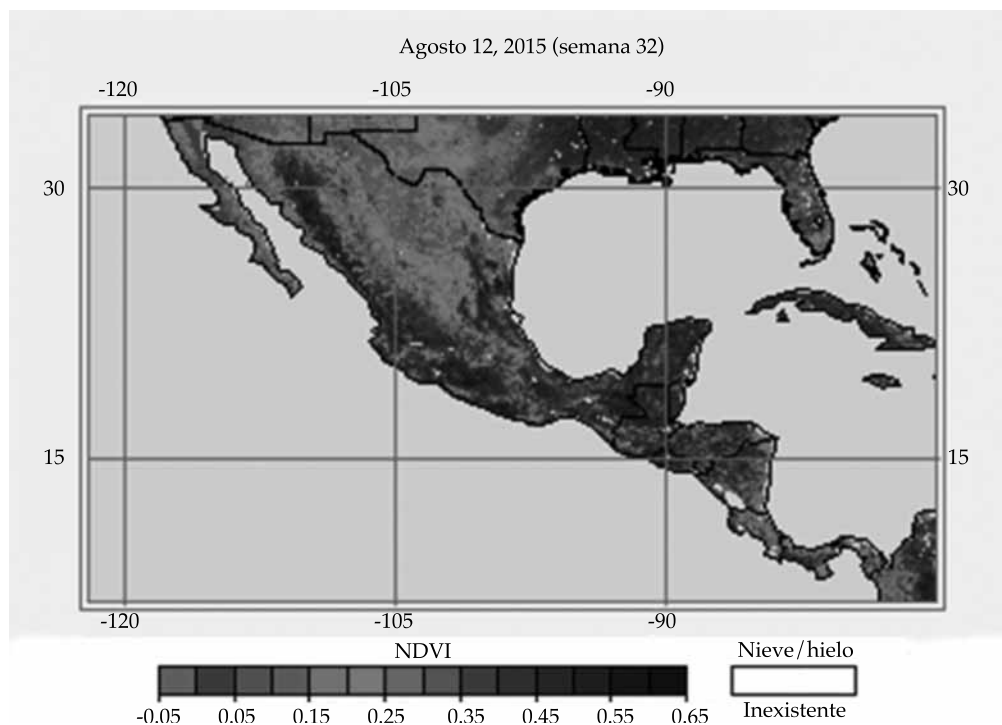


Figura 9. Ejemplo de mapa de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

de suelo se emplea como un predictor importante para temperatura y humedad, en este caso su uso es para determinar el contenido de la humedad del suelo sólo en los periodos en los que se elabora el MSM. La colaboración para la elaboración del NADM ha permitido extender este producto hasta México y es la información que se usa en la actualidad.

Por otra parte, México está elaborando su propia información histórica de humedad de suelo, considerando otro tipo de modelos hidrológicos que toman en cuenta procesos de interacción dinámica suelo-planta-atmósfera, como son los modelos NOAH y VIC (Liang, Lettenmaier, Wood, & Burges, 1994).

El modelo OSU-LSM mantiene una constante mejora en su esquema numérico a través de la colaboración institucional de NCAR, Oregon State University, Air Force e Hydrologic Research Laboratory; así es como conforman el acrónimo NOAH, siendo uno de los modelos más completos para representar la dinámica

suelo-planta-atmósfera. El modelo simula humedad del suelo (líquido y sólido), temperatura del suelo, temperatura en superficie del suelo, capa de nieve, contenido de agua equivalente en nieve, contenido de agua en la cobertura vegetal, y flujos de agua y energía en términos de los balances de energía y agua en la superficie (Mitchell, 2005). La representación del ciclo completo la componen en el balance de agua en la superficie, la evaporación total integrada por la evaporación directa del suelo, evapotranspiración de la cobertura vegetal y evaporación del contenido de agua foliar, entre otros. La solución dinámica la integra la ecuación de Richards para el movimiento de agua y temperatura en el suelo, manteniendo el balance a través de la ecuación de continuidad. La figura 10 muestra un valor preliminar de la climatología para México de humedad de suelo para el mes de julio, estimada por el modelo NOAH a través del sistema GLDAS de la NOAA; hay un proceso de corrección utilizando información

disponible en redes de observación, como la que opera la Conagua/SMN en colaboración con la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (Conamp).

Las condiciones hidrológicas definen la escala de mediano y largo plazos en el monitoreo de la sequía; la información sobre las condiciones de los escurrimientos (ríos) y embalses tanto naturales como artificiales (presas) definen su condición precedente. La Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR) de la Conagua constantemente vigila el estado que guardan las presas y escurrimientos del país, haciendo énfasis en el almacenamiento de las principales presas; maneja umbrales de almacenamiento que relacionan el impacto de severidad dependiendo de su porcentaje de llenado, definiendo así que en un almacenamiento entre 65 y 80% de llenado, la severidad se considera como mínima y tiene una reducción en la dotación de 10 a 15%; cuando el almacenamiento es

de entre 40 y 65% del llenado, la severidad es moderada y la reducción en la dotación fluctúa de 15 a 25%; si el almacenamiento varía de 25 a 40% del llenado, la severidad se considera severa y la reducción en la dotación oscila entre 25 y 40%; finalmente, cuando el almacenamiento es menor a 25% de su llenado, la severidad se clasifica como crítica y se establece una reducción en la dotación mayor a 40%.

La elaboración final del MSM considera que los índices y variables se integren mediante un SIG. Después, por un consenso de expertos, se elabora el Monitor de Sequía para México, donde se determinan las regiones afectadas por sequía y su grado de impacto plasmado en un solo mapa (figura 11). Se incluye en forma tabular el impacto de la misma por municipio, información que se toma para la atención de programas federales y una narrativa o discusión, haciendo mención de los impactos y estadísticas en temperatura y precipitación que reflejan las condiciones imperantes del mes en curso.

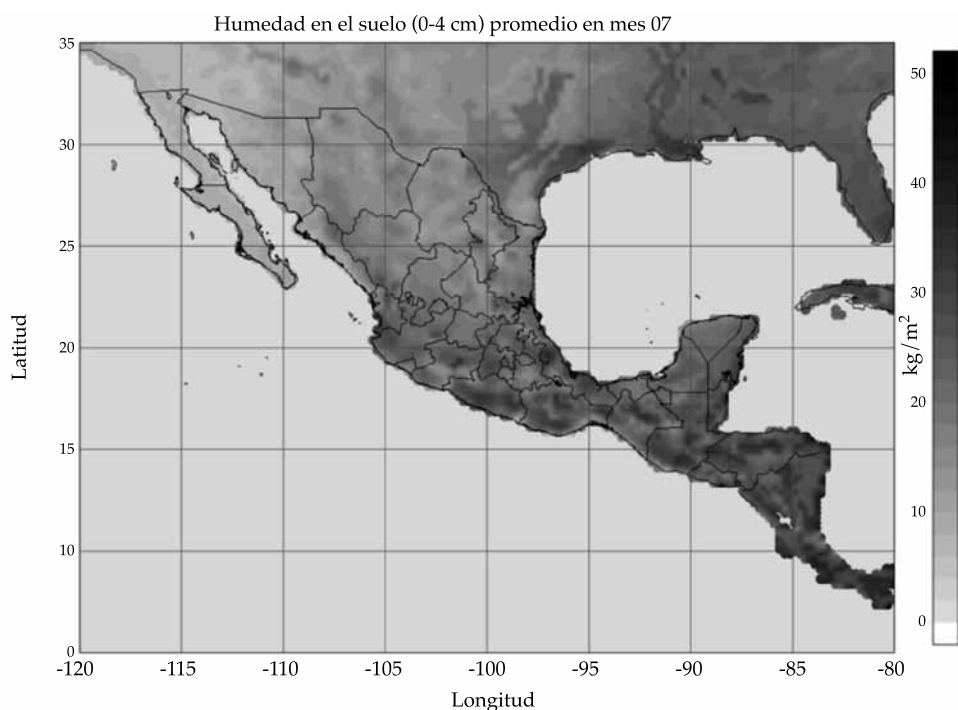


Figura 10. Media de humedad del suelo del mes de julio obtenido con el modelo NOAA a través del sistema GLDAS de la NOAA, unidades en kg/m^2 .

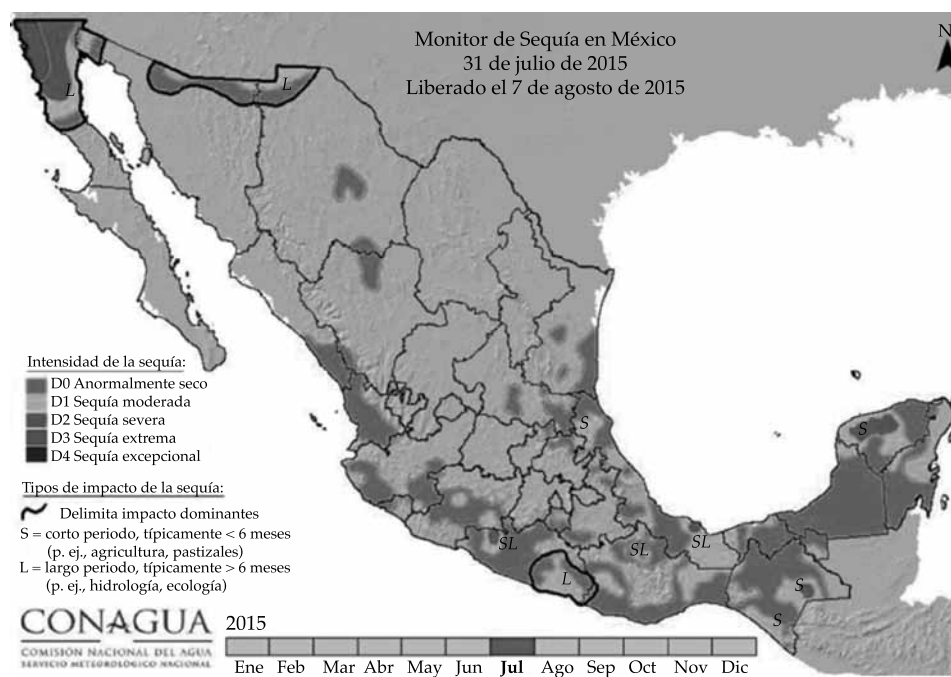


Figura 11. Mapa del Monitor de Sequía para México elaborado para el mes de julio de 2015.

Resultados y discusión

Se presenta la metodología actual sobre la elaboración del MSM. Se consolida una iniciativa con la que se atiende el impacto de uno de los fenómenos naturales que provoca mayores daños a la sociedad. El uso de esta información se extiende a prácticamente todos los sectores socioeconómicos, con lo que se permite atender a programas y grupos vulnerables, entre otros. Es información fundamental para la aplicación de una de las iniciativas más completas para reducir sus riesgos e impactos asociados con las sequías (Pronacose). Por su importancia, requiere de especial atención y resulta necesario mantener una constante mejora de las capacidades tanto en infraestructura de medición como en personal técnico especializado.

La cantidad de índices para cuantificar a la sequía son suficientes y de variado propósito. La mayoría de ellos son producidos en EUA. Los índices que se utilizan satisfacen los requie-

rimientos en cuanto a calidad, oportunidad y elaboración del mismo. Sin embargo, es recomendable mejorar la generación de productos propios, como son los de humedad de suelo, índice de Palmer y vegetación, entre otros.

Dentro del funcionamiento del MSM es fundamental la calidad de la información de las redes de observación hidroclimáticas, porque de ahí depende el correcto despliegue de la información en el mapa. En virtud de la cantidad de estaciones climáticas utilizadas por el SMN, es necesario aumentar su número, sobre todo en regiones donde las sequías son recurrentes y la información climática es escasa. El apoyo al mantenimiento a estas redes es crítico para que el MSM tenga la calidad aceptable que se requiere para la toma de decisiones.

Conclusiones

La sequía es un fenómeno de lenta evolución, regularmente oculto en la variabilidad climática y en muchas ocasiones sólo se detecta cuando

ya está presente, llegando a tener impactos cuantiosos. Por ello es necesario mejorar los programas de monitoreo e implementar programas de prevención. Se requiere trabajar hacia la sistematización del MSM, y resulta necesario un sistema de consenso o ponderación para una evaluación objetiva, que permita su reproducción, así como un sistema en línea, donde los usuarios puedan retroalimentar a los climatólogos sobre los impactos de las sequías en todos los sectores socioeconómicos.

Con información hidrológica y climatológica confiable es posible avanzar hacia la perspectiva de la sequía, pues en la historia hay ocurrencia de fenómenos atmosféricos que conducen hacia la “persistencia”, indicando así que los patrones pueden ser indicativos de lo que se puede esperar en el futuro y el rango en el que puede ser previsible. Por ello, es necesario un trabajo científico serio y formal que rescate la información climática histórica nacional, y determine la calidad y confiabilidad de la misma; esto permitirá mayor detalle regional y una mejora en la gestión integrada del agua.

Agradecimientos

Se agradece a la Conagua, en particular a la Subdirección General Técnica y a la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional por la información y colaboración prestada dentro del Pronacose y el Monitor de Sequías de México, así como a la maestra en ciencias Adelina Albanil y al ingeniero Reynaldo Pascual por las amplias discusiones técnicas sostenidas en innumerables ocasiones; también se agradece al maestro en ciencias Esteban Pardo, quien brindó todo su apoyo para el tratamiento de las figuras.

Referencias

- Anderson, M. C., Hain, C., Otkin, J., Zhan, X., Mo, K., Svoboda, M., Wardlow, B., & Pimstein, A. (2013). An Intercomparison of Drought Indicators Based on Thermal Remote Sensing and NLDAS-2 Simulations with U.S. Drought Monitor Classifications. *Journal of Hydrometeorology (Advances in Drought Monitoring- Special Collection)*, 14, 1035-1056.
- American Meteorological Society (1997). Meteorological Drought – Policy Statement. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 847-849.
- Frick, D. M., Bode, D., & Salas, J. D. (June, 1990). Effect of Drought on Urban Water Supplies. I: Drought Analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(6), 733-753.
- Hao, Z., & Aghakouchak, A. (2013). Multivariate Standardized Drought Index: A Parametric Multi-Index Model. *Advances in Water Resources*, 57, 12-18.
- Hao, Z., & Aghakouchak, A. (2014). A Nonparametric Multivariate Multi-Index Drought Monitoring Framework. *Journal of Hydrometeorology*, 15, 89-101.
- Huang, J., Van den Dool, H. M., & Georgakakos, K. (1996). Analysis of Model-Calculated Soil Moisture over the United States (1931-1993) and Applications to Long-Range Temperature Forecasts. *Journal of Climate*, 9, 1350-1362.
- Heim Jr., R. R. (2002). A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 1149-1165.
- Kogan, F. N. (1997). Global Drought Watch from Space. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78(4), 621-636.
- Lawrimore, J., Heim Jr., R. R., Svoboda, M., Swail, V., & Englehart, P. (August, 2002). Beginning a New Era of Drought Monitoring Across North America. *Bulletin of The American Meteorological Society (BAMS)*, 83, 1191-1192.
- Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., & Burges, S. J. (1994). A Simple Hydrological based Model of Land Surface Water and Energy Fluxes for GSMS. *J. Geophys. Res.*, 99(D7), 14415-14428.
- McRoberts, D. B., & Nielsen-Gammon, J. W. (2012). The Use of High-Resolution Standardized Precipitation Index for Drought Monitoring and Assessment. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51, 68-83.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). *The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales*. Eight Conference on Applied Climatology, January 17-22, Anaheim, California.
- Mitchell, K. (2005). *The Community NOAA Land-Surface Model (LSM). User's Guide*. Recovered from ftp://ftp.emc.ncep.noaa.gov/mmb/gcp/ldas/noahlsn/ver_2.7.1.
- Robeson, S. M. (2008). Applied Climatology: Drought. *Progress in Physical Geography*, 32(3), 303-309.
- Svoboda, M., LeCompte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinkey, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D., & Stephens, S. (August, 2002). The Drought Monitor. *Bulletin of The American Meteorological Society (BAMS)*, 83, 1181-1190.
- Weber, L., & Nkemdrim, L. (1998). Palmer's Drought Index Revisited. *Geografiska Annaler*, 80A(2), 153-172.
- Wilhite, D., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10(3), 111-120.
- Wilhite, D., Svoboda, M. D., & Hayes, M. (2007). Understanding the Complex Impacts of Drought: A Key to Enhancing Drought Mitigation and Preparedness.

Water Resources Management, 21, 763-774.

Dirección institucional del autor

Dr. René Lobato-Sánchez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Coordinación de Hidrología
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono: +52 (777) 3293 600, extensión 858
rene_lobato@tlaloc.imta.mx