



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

MONITOREO DE SEQUÍAS EN MÉXICO A TRAVÉS DE ÍNDICES  
MULTIVARIADOS

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

PRESENTA:  
ROBERTO ALEJANDRO REAL RANGEL

TUTOR PRINCIPAL  
DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE 2016



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA  
Secretario: DR. JOSÉ ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIÚ  
Vocal: DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA  
1<sup>er</sup>. Suplente: DR. JOSÉ AGUSTÍN BREÑA NARANJO  
2<sup>d o</sup>. Suplente: DR. VÍCTOR HUGO ALCOCER YAMANAKA

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, CD. MX

**TUTOR DE TESIS:**

DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA

-----  
**FIRMA**



# Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por otorgarme su puntual y seguro apoyo económico para manutención a través de la beca CONACyT/UNAM. Sin éste, concluir mis estudios de Maestría habría sido una tarea imposible. Gracias.

A la Facultad de Ingeniería de la UNAM, por abrir sus aulas a estudiantes que, como yo, llegan de otros estados de la República con la ilusión de formar parte de la Máxima Casa de Estudios. Por otorgar tantas facilidades para mi desarrollo académico. Gracias.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por ofrecerme sus instalaciones para realizar esta tesis de Maestría. Gracias.

A mis maestros, por entregarlo todo dentro y fuera del aula. Gracias.

Al Dr. Adrián Pedrozo Acuña, por creer en mí. Por ofrecerme su asesoría y apoyo académicos, y su consejo honesto. Gracias.

A Diana Fernández y Marco López, por sus consejos y retroalimentación. Gracias.

A Rosa María, Alejandro, Adriana y Ema, por hacerme y dejarme ser. Por estar atentos, aun desde lejos. Por su desmedido amor. Gracias.

A Adriana Selene, por hacer tuyas mis metas. Por escucharme. Por hablarme. Por su respaldo incondicional. Por su empatía frente a mi estrés. Mil gracias. Esta tesis y esta maestría, íntegramente, son también tuyas.

A Dante Alejandro, por venir. Por ser un motivo. Gracias, hijo.



# Resumen

La sequía es un fenómeno natural que se manifiesta como un periodo de déficit de humedad debido a la variabilidad climática normal en cada región, y que puede convertirse en un desastre si su riesgo y la vulnerabilidad ante su ocurrencia, no son adecuadamente manejados (Blauhut *et al.*, 2016; Wilhite, 2000). Durante los últimos veinte años, este fenómeno ha provocado pérdidas económicas de cinco mil millones de dólares anuales a nivel mundial, y ha sumado 1 100 millones de personas afectadas, de las que 22 000 han sido víctimas fatales (CRED, 2015).

Existe evidencia que sugiere que el impacto de la sequía a nivel mundial se verá incrementado en el futuro (Easterling *et al.*, 2000; IPCC, 2007; Katz y Brown, 1992; Maestre, Salguero-Gómez y Quero, 2012). En este sentido, la evaluación de los impactos de sequías pasadas representa un paso crucial hacia el desarrollo de medidas que reduzcan la vulnerabilidad frente a la amenaza (Stahl *et al.*, 2016).

Con esto en mente, el presente estudio tiene como objetivo implementar y evaluar un marco de trabajo multivariado para el monitoreo de sequías en México, a través del que sea posible cuantificar de manera objetiva la intensidad y magnitud de los eventos de sequía en todo el territorio nacional, utilizando para ello fuentes de información proveniente de los sistemas de análisis retrospectivo y de asimilación de datos globales GLDAS-1, GLDAS-2 y MERRA-2, de la NASA.

La viabilidad y confiabilidad de estas fuentes de información fue evaluada usando como referencia las observaciones directas de precipitación y escurrimiento de estaciones pluviométricas e hidrométricas en todo el país. De esta evaluación, MERRA-2 emerge como el producto de mejores métricas de desempeño dado que refleja, con ciertas limitaciones, la dispersión y magnitud de dichos indicadores en diez sitios evaluados.

La definición de sequía adoptada en este estudio es la propuesta por McKee, Doesken y Kleist (1993), basada en las variables hidrológicas estandarizadas, que consisten en la diferencia

Cuadro 1: Categorías de intensidad de sequía y humedad en función del valor del índice estandarizado de sequía (Svoboda *et al.*, 2002).

| Rango                 | Clave | Categoría               |
|-----------------------|-------|-------------------------|
| $SI \leq -2.0$        | D4    | Sequía excepcional      |
| $-2.0 < SI \leq -1.6$ | D3    | Sequía extrema          |
| $-1.6 < SI \leq -1.3$ | D2    | Sequía severa           |
| $-1.3 < SI \leq -0.8$ | D1    | Sequía moderada         |
| $-0.8 < SI \leq -0.5$ | D0    | Anormalmente seco       |
| $-0.5 < SI < 0.5$     |       | Normal                  |
| $0.5 \leq SI < 0.8$   | W0    | Anormalmente húmedo     |
| $0.8 \leq SI < 1.3$   | W1    | Moderadamente húmedo    |
| $1.3 \leq SI < 1.6$   | W2    | Severamente húmedo      |
| $1.6 \leq SI < 2.0$   | W3    | Extremadamente húmedo   |
| $SI \geq 2.0$         | W4    | Excepcionalmente húmedo |

que existe entre el valor analizado y la media, dividida entre la desviación estándar de los registros históricos de la variable. Una secuencia de valores positivos indica un periodo húmedo, y una secuencia de negativos representa a un periodo seco.

La propuesta original del índice estandarizado describe la distribución de frecuencia de la variable usando una función de densidad de probabilidad Gamma de dos parámetros. Sin embargo, en este estudio fue empleada una simplificación propuesta recientemente por Farahmand y AghaKouchak (2015), que consiste en calcular la probabilidad empírica mediante una ecuación de punteo.

Una vez obtenido el valor de la probabilidad acumulada, el índice estandarizado (SI) se determina como sigue:

$$SI = \phi^{-1}(p)$$

donde  $\phi$  es la función de distribución normal estándar, y  $p$  es la probabilidad acumulada.

Los resultados de los índices estandarizados de sequía (SI) son clasificados según se muestra en el Cuadro 1, lo que asigna una categoría de severidad que, aunque subjetiva, resulta útil para comunicar las condiciones de sequía a los tomadores de decisiones y público general.

Hao y AghaKouchak (2013) propusieron un Índice Estandarizado Multivariado de Sequía (MSDI), que es una versión extendida del análisis estandarizado de McKee, Doesken y Kleist (1993), con el objetivo de combinar la información obtenida de dos (o más) variables relacionadas con la sequía (*e. g.*, precipitación y humedad del suelo) usando la distribución de probabilidad conjunta de ambas variables, estimada con ayuda de un modelo multivariado de punteo (Hao y AghaKouchak, 2014; Yue *et al.*, 1999).

La integración de múltiples variables en el MSDI busca mejorar la identificación del inicio y

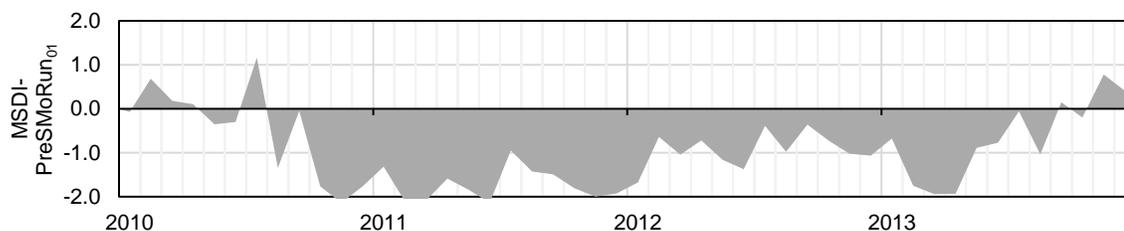


Figura 1: Serie de tiempo del MSDI-PreSMoRun<sub>01</sub> promedio en la región hidrológica Nazas-Aguanaval en el periodo 2010-2013.

persistencia de un evento, dado que el análisis conjunto es capaz de identificar una sequía, aun cuando las distintas variables analizadas presenten valores cercanos a un umbral de alerta definido, pero sin alcanzarlo. Además, en caso de que todas las variables analizadas alcancen el umbral de alerta, el MSDI otorgará un mayor grado de severidad a las condiciones de sequía que si fueran éstas analizadas por separado. Esto es un reflejo de la excepcionalidad de observar simultáneamente valores críticos en más de un indicador.

Resulta interesante analizar, además de la fluctuación de la intensidad de sequía, la variación de su magnitud ( $M$ ). Este rasgo refleja la intensidad de la sequía acumulada en toda la duración de un evento, por lo que es de esperarse que las regiones que han permanecido durante más (menos) tiempo en condiciones de sequía presenten una mayor (menor) magnitud.

Hao y AghaKouchak (2014) mostraron la eficiencia de este método para detectar el inicio y la persistencia de un periodo seco con el uso de dos variables (precipitación y humedad del suelo). En este estudio se ha evaluado la eficiencia del enfoque con el análisis conjunto de tres variables (precipitación, humedad del suelo y escurrimiento), con el objetivo de detectar todo el proceso mediante el que la sequía se propaga a lo largo del sistema hidrológico.

El uso operacional de la metodología se demuestra con el análisis de dos eventos recientes de sequía ocurridos en México: (i) Nazas-Aguanaval 2010-2013, y (ii) Oaxaca 2015.

Con respecto al caso Nazas-Aguanaval 2010-2013, la serie de tiempo del Índice Estandarizado Multivariado de Sequía para Precipitación, Humedad del Suelo y Ecurrimiento (MSDI-PreSMoRun<sub>01</sub>) (Figura 1) identifica una sequía prolongada de 35 meses (casi tres años continuos de sequía) que inició en octubre de 2010 y terminó en agosto de 2013, con una intensidad máxima de sequía de  $\text{MSDI-PreSMoRun}_{01} = -2.1$  (*sequía excepcional*), alcanzada en noviembre/2010 y junio/2011.

El análisis de la magnitud promedio en la región identificó dos picos: en febrero/2012 y en junio/2013. El último pico, el mayor de ambos, coincide con el otorgamiento de la “Decla-

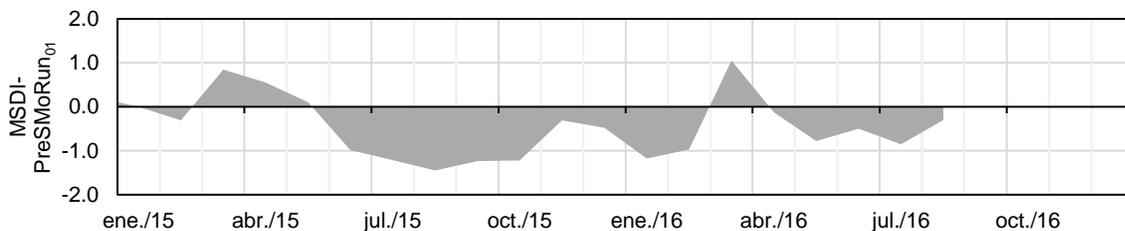


Figura 2: Serie de tiempo del MSDI-PreSMoRun<sub>01</sub> promedio en el estado de Oaxaca en el periodo 2015-2016.

ratoria de Desastre Natural en el sector agropecuario, acuícola y pesquero, a consecuencia de la sequía y en virtud de los daños ocasionados por dicho fenómeno que afectó a [39] municipios [...] del Estado de Durango” (SAGARPA, 2013).

Por otro lado, en el caso de Oaxaca 2015, la metodología permitió detectar una sequía que inició en junio/2015 y finalizó en febrero/2016 (nueve meses de duración), cuya categoría de mayor intensidad fue de *sequía severa* durante agosto/2015 (ver la Figura 2).

Así mismo, la magnitud del evento tuvo su punto crítico promedio en el estado en febrero/2016, periodo durante el que los reportes de afectaciones en el estado aumentaron.

Los resultados de este estudio hacen posible concluir que el uso de múltiples variables para monitorear la intensidad de sequía a través del MSDI permite detectar la propagación del déficit de agua a través del sistema hidrológico con información específica de cada variable analizada. Esto evita el uso de ventanas móviles para reflejar artificialmente los impactos de una sequía en distintas fuentes de agua. Además, el uso conjunto del MSDI con los índices estandarizados univariados de las variables integradas en el primero, permite definir la ponderación que cada una presentó sobre la intensidad en cada paso de tiempo analizado. Esto hace posible el análisis detallado de cada evento y estimar la variación del impacto principal a lo largo de su duración.

# Índice general

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introducción</b>                            | <b>1</b>  |
| 1.1. Motivación del estudio . . . . .             | 1         |
| 1.2. Objetivo del estudio . . . . .               | 5         |
| 1.3. Estructura del documento . . . . .           | 6         |
| <b>2. Antecedentes</b>                            | <b>7</b>  |
| 2.1. ¿Qué es una sequía? . . . . .                | 7         |
| 2.1.1. Definición general . . . . .               | 7         |
| 2.1.2. Tipos de sequía . . . . .                  | 9         |
| 2.2. Cuantificación de sequías . . . . .          | 12        |
| 2.2.1. Características de las sequías . . . . .   | 12        |
| 2.2.2. Indicadores e índices de sequía . . . . .  | 14        |
| 2.3. Monitoreo de sequías . . . . .               | 25        |
| 2.3.1. Monitoreo de sequías en el mundo . . . . . | 26        |
| 2.3.2. Monitoreo de sequías en México . . . . .   | 37        |
| <b>3. Metodología</b>                             | <b>41</b> |
| 3.1. Fuentes de información . . . . .             | 42        |

|   |            |
|---|------------|
| 3.1.1. Productos de observación directa . . . . .                     | 42         |
| 3.1.2. Productos de asimilación de datos y reanálisis . . . . .       | 43         |
| 3.2. Índices estandarizados de sequía . . . . .                       | 49         |
| 3.3. Análisis multivariado de sequías . . . . .                       | 52         |
| 3.3.1. Índice Estandarizado Multivariado de Sequía . . . . .          | 53         |
| 3.4. Magnitud de periodos secos . . . . .                             | 58         |
| 3.5. Elaboración de mapas de sequía . . . . .                         | 59         |
| <b>4. Resultados</b>  | <b>63</b>  |
| 4.1. Evaluación de los productos de asimilación de datos . . . . .    | 63         |
| 4.1.1. Precipitación . . . . .  | 67         |
| 4.1.2. Escurrimiento . . . . .  | 74         |
| 4.2. Aplicación de los índices multivariados para monitoreo . . . . . | 83         |
| 4.2.1. Caso 1: Región hidrológica Nazas-Aguanaval 2010-2013 . . . . . | 83         |
| 4.2.2. Caso 2: Oaxaca 2015 . . . . .                                  | 89         |
| <b>5. Conclusiones</b>  | <b>103</b> |
| <b>A. Mapas de sequía en México en 2016</b>                           | <b>107</b> |
| <b>B. Observatorio Mexicano de Sequías</b>                            | <b>119</b> |

# Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| 1.1. Mayores pérdidas económicas debidas a sequías a nivel mundial en el periodo 1900-2016. Fuente: <a href="http://www.emdat.be">http://www.emdat.be</a> <sup>1</sup> . . . . . | 2  |
| 2.1. Diferentes categorías de sequía y su desarrollo (modificado de van Loon (2015)).  | 10 |
| 2.2. Interfaz gráfica de usuario del Monitor de Sequía de E. U. A. . . . .   | 27 |
| 2.3. Interfaz gráfica de usuario del Sistema Global Integrado de Monitoreo y Predicción de Sequías. . . . .  | 29 |
| 2.4. Interfaz gráfica de usuario del visor de mapas del Observatorio Europeo de Sequía. . . . .  | 31 |
| 2.5. Interfaz gráfica de usuario del Monitor Africano de Inundación y Sequía. . .  | 34 |
| 2.6. Interfaz gráfica de usuario del Monitor de Sequía en México. . . . .  | 38 |
| 2.7. Interfaz gráfica de usuario del mapa de Índice Estandarizado de Precipitación del Monitor de Sequía en México. . . . .  | 39 |
| 3.1. Variación temporal de los índices estandarizados de sequía promedio en el estado de Oaxaca en el periodo 2015-2016. . . . .   | 56 |
| 3.2. Ajuste del $SPI_{03}$ con el $SSI_{01}$ correspondientes a los índices promedio en el estado de Yucatán, en el periodo 2015-2016. . . . .                                   | 58 |
| 3.3. Arreglo de los datos extraídos de los productos mallados. . . . .   | 60 |
| 3.4. Mapa del $MSDI-PreSM_{01}$ en México en agosto de 2016. . . . .   | 62 |

|  |    |
|--|----|
| 4.1. Localización de las estaciones climatológicas (círculos etiquetados con “C”) e hidrométricas (triángulos etiquetados con “H”) usadas para la evaluación de los productos de asimilación de datos. . . . .               | 66 |
| 4.2. Gráficas de dispersión de la precipitación acumulada mensual, en mm (a, b, c) y SPI <sub>01</sub> (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación Cañada Honda (01004). . . . . | 68 |
| 4.3. Fragmento de las series de tiempo del SPI <sub>01</sub> calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación Cañada Honda (01004). . . . .                            | 68 |
| 4.4. Gráficas de dispersión de la precipitación acumulada mensual, en mm (a, b, c) y SPI <sub>01</sub> (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación Mexicali (02033). . . . .     | 69 |
| 4.5. Fragmento de las series de tiempo del SPI <sub>01</sub> calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación Mexicali (02033). . . . .                                | 69 |
| 4.6. Gráficas de dispersión de la precipitación acumulada mensual, en mm (a, b, c) y SPI <sub>01</sub> (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación Callejones (06003). . . . .   | 70 |
| 4.7. Fragmento de las series de tiempo del SPI <sub>01</sub> calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación Callejones (06003). . . . .                              | 70 |
| 4.8. Gráficas de dispersión de la precipitación acumulada mensual, en mm (a, b, c) y SPI <sub>01</sub> (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación Tonalá (07168). . . . .       | 71 |
| 4.9. Fragmento de las series de tiempo del SPI <sub>01</sub> calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación Tonalá (07168). . . . .                                  | 71 |
| 4.10. Gráficas de dispersión de la precipitación acumulada mensual, en mm (a, b, c), y SPI <sub>01</sub> (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación Los Ídolos (30068). . . . . | 72 |

|  |    |
|--|----|
| 4.11. Fragmento de las series de tiempo del $SPI_{01}$ calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación Los Ídolos (30068). . . . .                                      | 72 |
| 4.12. Variación de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) del SPI de los distintos productos de asimilación de datos y estaciones climatológicas en función de la escala temporal de análisis. . . . .                            | 73 |
| 4.13. Gráficas de dispersión del escurrimiento acumulado mensual, en $hm^3$ (a, b, c), y $SRI_{01}$ (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación San Bernardo (09067). . . . .      | 75 |
| 4.14. Fragmento de las series de tiempo del $SRI_{01}$ calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación San Bernardo (09067). . . . .                                    | 75 |
| 4.15. Gráficas de dispersión del escurrimiento acumulado mensual, en $hm^3$ (a, b, c), y $SRI_{01}$ (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación Bolaños (12428). . . . .           | 76 |
| 4.16. Fragmento de las series de tiempo del $SRI_{01}$ calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación Bolaños (12428). . . . .   | 76 |
| 4.17. Gráficas de dispersión del escurrimiento acumulado mensual, en $hm^3$ (a, b, c), y $SRI_{01}$ (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación Tepehuaje (24301). . . . .         | 77 |
| 4.18. Fragmento de las series de tiempo del $SRI_{01}$ calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación Tepehuaje (24301). . . . .                                       | 77 |
| 4.19. Gráficas de dispersión del escurrimiento acumulado mensual, en $hm^3$ (a, b, c), y $SRI_{01}$ (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación Jesús Carranza II (29006). . . . . | 78 |
| 4.20. Fragmento de las series de tiempo del $SRI_{01}$ calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación Jesús Carranza II (29006). . . . .                               | 78 |

|   |    |
|---|----|
| 4.21. Gráficas de dispersión del escurrimiento acumulado mensual, en $\text{hm}^3$ (a, b, c), y $\text{SRI}_{01}$ (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación La Flor (36039). . . . .                          | 79 |
| 4.22. Fragmento de las series de tiempo del $\text{SRI}_{01}$ calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación La Flor (36039). . . . .   | 79 |
| 4.23. Variación de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) del SRI de los distintos productos de asimilación de datos y estaciones hidrométricas en función de la escala temporal de análisis. . . . .  | 80 |
| 4.24. Gasto observado en la estación Jesús Carranza II (29006) y gastos derivados de los productos de asimilación de datos en el periodo 2000-2005. . . . .   | 81 |
| 4.25. Localización de la región hidrológica Nazas Aguanaval. . . . .  | 84 |
| 4.26. Series de tiempo del SPI para distintas escalas temporales para la región hidrológica Nazas-Aguanaval en el periodo 2010-2013. . . . .  | 85 |
| 4.27. Series de tiempo de los índices estandarizados de sequía promedio en la región hidrológica Nazas-Aguanaval en el periodo 2010-2013. . . . .   | 86 |
| 4.28. Gráfico de dispersión del índice bivariado de sequía $\text{MSDI-PreSMo}_{01}$ y el índice trivariado de sequía $\text{MSDI-PreSMoRun}_{01}$ promediados en la extensión de la región hidrológica Nazas-Aguanaval, para el periodo 1980-2016. . . . . | 88 |
| 4.29. Porcentaje de la superficie de la región hidrológica Nazas-Aguanaval afectada por algún grado de sequía, en función del índice trivariado $\text{MSDI-PreSMoRun}_{01}$ en el periodo 2010-2013. . . . .   | 89 |
| 4.30. Mapas mensuales de la sequía en la región hidrológica Nazas-Aguanaval en el periodo octubre/2010-agosto/2013 con el índice trivariado $\text{MSDI-PreSMoRun}_{01}$ . . . . .  | 90 |
| 4.31. Mapas de magnitud de sequía en los periodos de mayor intensidad en la región hidrológica Nazas-Aguanaval durante el evento 2010-2011. . . . .   | 95 |
| 4.32. Serie de tiempo de magnitud de sequía ( $M$ ) promedio en la región hidrológica Nazas-Aguanaval en el periodo 2010-2013. . . . .  | 95 |
| 4.33. Localización del estado de Oaxaca. . . . .  | 96 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.34. Series de tiempo del SPI promedio en el estado de Oaxaca en el periodo 2015-2016. . . . .   | 97  |
| 4.35. Series de tiempo de los índices estandarizados de sequía promedio en el estado de Oaxaca en el periodo 2015-2016. . . . .   | 98  |
| 4.36. Porcentaje de la superficie del estado de Oaxaca afectada por algún grado de sequía, en función del índice trivariado MSDI-PreSMoRun <sub>01</sub> en el periodo 2015-2016. . . . .   | 99  |
| 4.37. Gráfico de dispersión del índice bivariado de sequía MSDI-PreSMo <sub>01</sub> y el índice trivariado de sequía MSDI-PreSMoRun <sub>01</sub> promediados en la extensión del estado de Oaxaca, para el periodo 1980-2016. . . . . | 100 |
| 4.38. Mapas mensuales de la sequía en el estado de Oaxaca en el periodo junio/2015-febrero/2016 con el índice trivariado MSDI-PreSMoRun <sub>01</sub> . . . . .   | 101 |
| 4.39. Serie de tiempo de magnitud de sequía promedio en el estado de Oaxaca en el periodo 2015-2016. . . . .  | 102 |
| A.1. SPI <sub>01</sub> en México en el periodo enero-agosto de 2016. . . . .  | 108 |
| A.2. SPI <sub>03</sub> en México en el periodo enero-agosto de 2016. . . . .  | 109 |
| A.3. SPI <sub>06</sub> en México en el periodo enero-agosto de 2016. . . . .  | 110 |
| A.4. SPI <sub>09</sub> en México en el periodo enero-agosto de 2016. . . . .  | 111 |
| A.5. SPI <sub>12</sub> en México en el periodo enero-agosto de 2016. . . . .  | 112 |
| A.6. SRI <sub>01</sub> en México en el periodo enero-agosto de 2016. . . . .  | 113 |
| A.7. SSI <sub>01</sub> en México en el periodo enero-agosto de 2016. . . . .  | 114 |
| A.8. MSDI-PreRun <sub>01</sub> en México en el periodo enero-agosto de 2016. . . . .  | 115 |
| A.9. MSDI-PreSMo <sub>01</sub> en México en el periodo enero-agosto de 2016. . . . .  | 116 |
| A.10. MSDI-PreSMoRun <sub>01</sub> en México en el periodo enero-agosto de 2016. . . . .  | 117 |
| B.1. Interfaz de usuario del sitio web del Observatorio Mexicano de Sequía. . . . .   | 120 |



# Índice de cuadros

|  |    |
|--|----|
| 2.1. Mayores impactos de las sequías en relación con sus diferentes categorías (modificado de van Loon, 2015). . . . .   | 12 |
| 2.2. Fenómenos reflejados en cada escala temporal del SPI y sus aplicaciones (NDMC, 2016; WMO, 2012). . . . .  | 20 |
| 2.3. Categorías de intensidad de sequía para el SPI (McKee, Doesken y Kleist, 1993). . . . .   | 20 |
| 2.4. Categorías de magnitud de sequía en el Monitor de Sequía de E. U. A. (Svoboda <i>et al.</i> , 2002). . . . .  | 28 |
| 2.5. Categorías del Indicador Combinado de Sequía (Sepulcre-Canto <i>et al.</i> , 2012) para el Observatorio Europeo de Sequía. . . . .  | 33 |
| 2.6. Categorías del Indicador Combinado de Sequía para el Observatorio de Sequía de Chile. . . . .   | 37 |
| 3.1. Categorías de intensidad de sequía y humedad en función del valor del índice estandarizado de sequía usado por el Monitor de Sequía de Norteamérica (Svoboda <i>et al.</i> , 2002). . . . . | 52 |
| 4.1. Estaciones climatológicas usadas para evaluar la variable de precipitación de los productos de asimilación de datos. . . . .  | 66 |
| 4.2. Estaciones hidrométricas usadas para evaluar la variable de escurrimiento de los productos de asimilación de datos. . . . .   | 66 |



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación del estudio

La sequía es un fenómeno natural que se manifiesta como un periodo de déficit de humedad debido a la variabilidad climática normal en cada región, en lugar de una desviación del clima normal (Glantz, 2003). Sin embargo, este fenómeno puede convertirse en un desastre si su riesgo y la vulnerabilidad ante su ocurrencia, no son adecuadamente manejados (Blauhut *et al.*, 2016; Wilhite, 2000), lo que incrementa los daños y sufrimiento (Guha-Sapir, Vos *et al.*, 2011).

Este fenómeno presenta una amplia gama de impactos directos e indirectos que van de aquellos apenas perceptibles por el hombre, hasta los que afectan el bienestar de naciones enteras. Desde el origen de la historia de la humanidad existen ejemplos de los efectos negativos de la sequía en el desarrollo de civilizaciones antiguas. Es el caso de aquellas originarias de Egipto (Weiss, 1982), Mesoamérica (Richardson, 2009), Grecia y Mesopotamia (Bernhardt, Horton y Stanley, 2012), en las que diversos estudios atribuyen su decadencia a una sucesión de periodos de escasez de agua y falta de alimento. Más recientemente, en el sureste norteamericano la gran sequía de California afectó severamente el medio ambiente y las actividades económicas de la zona, demostrando una vez más la fuerte interacción entre agua y sociedad. Esto ha dado lugar a un replanteamiento del concepto de sequía de tal manera que se incorpore el rol de los seres humanos en su mitigación o recrudescimiento (van Loon, Gleeson *et al.*, 2016).

Entre los diversos impactos asociados a este fenómeno natural, Stahl *et al.* (2016) propusieron la siguiente clasificación: (i) agricultura y ganadería, (ii) silvicultura, (iii) acuicultura

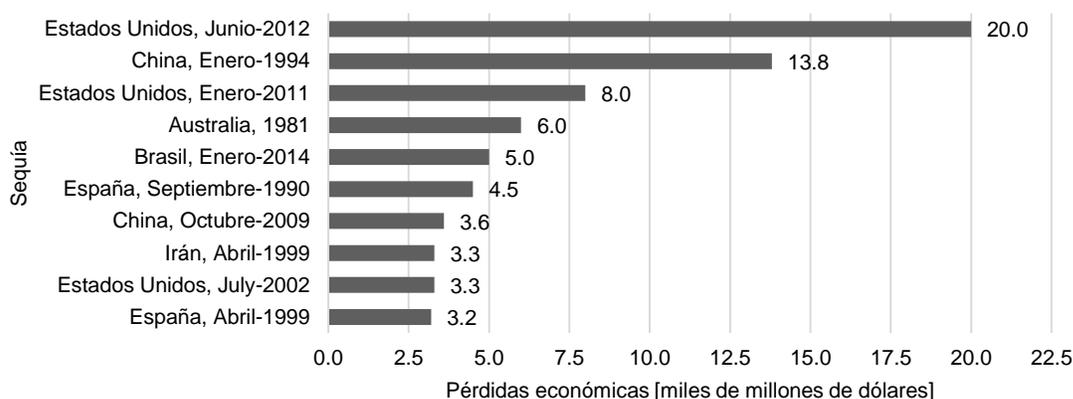


Figura 1.1: Mayores pérdidas económicas debidas a sequías a nivel mundial en el periodo 1900-2016. Fuente: <http://www.emdat.be> <sup>2</sup>.

y pesca, (iv) energía e industria, (v) transporte acuático, (vi) turismo y recreación, (vii) abastecimiento público de agua, (viii) calidad del agua, (ix) ecosistemas acuáticos, (x) ecosistemas terrestres, (xi) degradación del suelo, (xii) incendios forestales, (xiii) calidad del aire, (xiv) salud humana, y (xv) conflictos sociales.

Durante los últimos veinte años, las sequías han provocado pérdidas económicas de 5 000 millones de dólares anuales a nivel mundial, y han sumado 1 100 millones de personas afectadas —el 26 % del total de la población afectada por desastres naturales en ese periodo—, a pesar de representar solo el 5 % de la ocurrencia de desastres naturales<sup>1</sup>. El 4 % de las muertes relacionadas con desastres naturales (22 000 personas en el mismo periodo reportado anteriormente) han sido asociadas directamente a la ocurrencia de sequías. Sin embargo, la cantidad total de víctimas mortales podría ser mucho mayor, sobre todo si se consideran los efectos indirectos (no documentados) de este fenómeno, tales como la desnutrición, las enfermedades y los desplazamientos de población (CRED, 2015).

Dentro de las sequías más recientes, destacan las de los años 2011 y 2012 en Estados Unidos, cuyas pérdidas asociadas suman 28 000 millones de dólares. Este monto representa la mayor cantidad de dinero perdida para un solo periodo seco a nivel mundial desde 1900 (ver la Figura 1.1).

<sup>1</sup>Las inundaciones son el desastre natural más frecuente, representando el 43 % de los eventos ocurridos en el periodo 1995-2015.

<sup>2</sup>Los datos fueron obtenidos de la Base de Datos de Eventos de Emergencia (EM-DAT), que pertenece al Centro para la Investigación sobre la Epidemiología de Desastres (CRED) de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR). Si bien la fuente de esta información es confiable, resulta importante hacer énfasis en el carácter estimativo y no exhaustivo de los datos, debido a la falta de programas dedicados a la inspección y reconocimiento de impactos, durante y después de la ocurrencia de desastres naturales en muchos países.

De hecho, la sequía de 2011-2012 se extendió hasta gran parte del territorio mexicano, convirtiéndose en la peor sequía de los últimos 70 años en México. Este evento, afectó al 90 % del territorio nacional y causó pérdidas materiales que ascendieron a 150 000 millones de pesos (alrededor de 7 500 millones de dólares). El manejo de la emergencia por parte de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), consistió en poner en marcha medidas orientadas a mantener las capacidades productivas de las zonas agrícolas del país, así como a fomentar el manejo adecuado del agua y la activación de esquemas de aseguramiento y financiamiento (CONAGUA, 2014).

Por otro lado, a nivel mundial, existe evidencia que sugiere un incremento sostenido de la variabilidad interanual de precipitación e intensificación de eventos extremos (Easterling *et al.*, 2000; IPCC, 2007; Katz y Brown, 1992; Maestre, Salguero-Gómez y Quero, 2012), por lo que es posible anticipar que el impacto de la sequía se verá incrementado en el futuro. Paralelamente, el acelerado crecimiento poblacional, las migraciones hacia regiones áridas, la urbanización y la contaminación aportan un mayor grado de vulnerabilidad en muchas regiones del planeta (Rossi y Cancelliere, 2013).

En el Documento Rector de la Política Pública Nacional para la Sequía (CONAGUA, 2014), el Gobierno Federal mexicano reconoce la “necesidad de cambiar el enfoque de atender emergencias por otro que involucre más a las comunidades locales y busque prevenir y mitigar los efectos de los fenómenos mediante mecanismos de alerta temprana y participación ciudadana”. Esta visión es acorde con el *modelo estratégico* de gestión del riesgo de sequías, definido como un proceso proactivo de planeación, respuesta y recuperación basadas en el riesgo a largo plazo (Sayers *et al.*, 2016).

En este sentido, la evaluación de los impactos de sequías pasadas representa un paso crucial hacia el desarrollo de medidas que reduzcan la vulnerabilidad frente a la amenaza (Stahl *et al.*, 2016). Con este objetivo, a partir de la década de 1950 y aun en el presente, diversas investigaciones han propuesto una gran cantidad de medidas cuantitativas para determinar la severidad de la sequía. Por ejemplo, a través de la incorporación de fuentes de información provenientes de sistemas de asimilación de datos, y la definición de indicadores o índices de una o múltiples variables asociadas a la sequía como la precipitación y la humedad del suelo (*e. g.*, Kulik, 1962; McKee, Doesken y Kleist, 1993; Palmer, 1965; Palmer, 1968; Shafer y Dezman, 1982).

Tradicionalmente, la estimación de los índices de sequía se lleva a cabo usando información obtenida mediante observaciones directas de precipitación o gasto a través de estaciones climatológicas y de aforo del flujo en cauces (*e. g.*, Changnon Jr., 1987; Edwards y McKee, 1997; Méndez Pérez y Magaña, 2010; Reyes Chávez, 2001). La información proveniente de

estos sistemas de medición, constituyen el medio más directo para determinar la variación de algunas de las variables necesarias para el análisis de sequía. Sin embargo, en muchas regiones del mundo la distribución geográfica de las estaciones de aforo y climatológicas, resulta insuficiente para representar la variabilidad espacial de los indicadores. De forma similar, la asimetría de los sistemas de medición respecto a su frecuencia de muestreo, complica la estimación homogénea de los índices en el tiempo. Los registros se componen comúnmente de valores instantáneos o acumulados cada 24 horas y no logran capturar fluctuaciones que inician y terminan dentro de ventanas temporales menores. Más aún, los sitios de aforo presentan diferencias en su longitud de registro y calidad de información, lo que hace de la evaluación consistente de la sequía con observaciones terrestres un reto significativo (AghaKouchak y Nakhjiri, 2012).

En las últimas décadas, las técnicas e instrumentos de percepción remota para el monitoreo espacial de variables relacionadas con el ciclo hidrológico, ha evolucionado considerablemente. Este desarrollo ha permitido refinar su resolución espacial y temporal, lo que a su vez ha redundado en su utilización como fuente de información para análisis de variables hidrológicas como la precipitación (Sorooshian *et al.*, 2011), la humedad del suelo (Cashion *et al.*, 2005; Entekhabi *et al.*, 2004) y la evapotranspiración (Allen *et al.*, 2007; Anderson *et al.*, 2011). Los conjuntos de datos derivados de este tipo de productos cuentan con la virtud adicional de ser sometidos a procesos de validación y controles de calidad antes de ponerse a disposición pública, lo que reduce la probabilidad de encontrar inconsistencias durante el procesamiento de datos y estimación de índices de sequía (Damberg y AghaKouchak, 2014). De hecho, se anticipa que en el futuro el uso de información proveniente de sensores remotos se incremente de forma sustancial para la calibración de modelos, la evaluación de predicciones y la mejora de pronósticos a corto plazo (Beven, 2012). En México, el uso de estas fuentes de información es apenas incipiente, entre los estudios más destacados que incorporan su utilización, están aquellos presentados por Breña-Naranjo, Pedrozo-Acuña *et al.* (2015), quienes a través de información de satélites estimaron la precipitación generada por ciclones tropicales a nivel nacional; mientras que Breña-Naranjo, Laverde-Barajas y Pedrozo-Acuña (2016) utilizaron información de sistemas globales de asimilación de datos para la estimación nacional de la pan-evaporación. A pesar de estos avances, su empleo para la cuantificación y caracterización integrada de la sequía a través de diversos índices no ha sido reportado. Con la excepción del estudio de de Jesús, Breña-Naranjo y Pedrozo-Acuña (2016), quienes estimaron el índice estandarizado de precipitación en México a partir de datos de precipitación provenientes de satélite, demostrando su uso para estudios futuros más completos.

En todo el mundo, el desarrollo tecnológico de dichas herramientas y el avance en el co-

nocimiento de los índices de sequía han permitido la creación de sistemas de monitoreo y evaluación de la sequía a diferentes escalas espaciales (*e. g.*, regional, nacional, global). Dichos sistemas, integran observaciones derivadas de distintas fuentes de información (*i. e.*, satélites, radares en tierra, estaciones de aforo, etc.) con resultados de modelos climatológicos, hidrológicos y de superficie terrestre (AghaKouchak, 2015; Hao y AghaKouchak, 2014; Hao, AghaKouchak *et al.*, 2014; Sepulcre-Canto *et al.*, 2012; Sheffield, E. F. Wood *et al.*, 2014; Svoboda *et al.*, 2002). Lo que integra la representación espacio-temporal del sistema terrestre por medio de la combinación de diferentes fuentes de información (*i. e.*, *in situ*, asimilación de datos y percepción remota) en un solo producto.

Por otro lado, cabe señalar que no existe una variable hidrológica única que permita definir el comienzo, la persistencia y término de la sequía de una forma precisa. Esto se debe, a que el déficit de precipitación puede desarrollarse de manera rápida y terminar de una manera abrupta, mientras que el comienzo del déficit en la humedad del suelo responde con cierto retraso temporal a esta condición. Estas diferencias físicas complican mucho la definición de una variable única para la generación de una herramienta adecuada para el monitoreo y predicción de la sequía en el mundo. En este sentido, diversos investigadores han comenzado a explorar la implementación de índices multivariados que integren información de variables importantes para la adecuada y confiable detección de estos fenómenos (Hao y AghaKouchak, 2013; Hao y AghaKouchak, 2014).

El presente trabajo de investigación constituye el primer esfuerzo nacional que integra información proveniente de los sistemas de análisis retrospectivo y de asimilación de datos globales para la estimación de índices multivariados de variables hidrológicas relacionadas con la sequía. Por lo que la investigación aquí descrita utiliza los últimos avances en el estado del arte mundial para la generación de un marco de trabajo moderno que permita una mejor cuantificación de este fenómeno en México.

## 1.2. Objetivo del estudio

Este estudio tiene como objetivo implementar y evaluar un marco de trabajo multivariado para el monitoreo de sequías en México. A través del cual sea posible cuantificar de manera objetiva la intensidad y magnitud de los eventos de sequía en todo el territorio nacional, utilizando para ello fuentes de información de última generación.

### 1.3. Estructura del documento

El trabajo está integrado de la siguiente manera:

- En el Capítulo 2 se hace una revisión de los conceptos fundamentales necesarios para el estudio de las sequías, y los avances que se han realizados a nivel internacional y nacional con respecto a la cuantificación y monitoreo de este fenómeno y que sirven de base para alcanzar los objetivos de ese estudio.
- El Capítulo 3 contiene una descripción de los métodos y criterios aplicados para el análisis de la intensidad y magnitud de los eventos de sequía y para la elaboración de mapas.
- En el Capítulo 4 se realiza una evaluación de los productos de asimilación de datos y reanálisis empleados y se aplica la metodología seguida para reproducir dos eventos pasados, con el objetivo de validar su eficiencia.
- El Capítulo 5 contiene una serie de conclusiones a las que el análisis de los resultados ha dado luz. Así mismo, se proponen distintas líneas de trabajo por las que sería posible avanzar en el mismo sentido de esta investigación.
- Los apéndices al final de este documento contienen el conjunto de mapas de índices estandarizados de sequía correspondientes al periodo enero-agosto/2016; una descripción del sitio web del Observatorio Mexicano de Sequía, que contiene los resultados de este trabajo para su consulta.

# Capítulo 2

## Antecedentes

### 2.1. ¿Qué es una sequía?

Existe una gran cantidad de definiciones para este fenómeno climático, cuyas diferencias se explican a partir de la disciplina, contextos social y económico desde los que se aborda el tema (Wilhite, 2000). En palabras de Donald A. Wilhite (2005), *“la sequía tiene un significado diferente para un administrador de recursos hídricos, un agricultor, un operador de una planta hidroeléctrica, y un biólogo de vida salvaje”*.

A partir de esta definición, es evidente que la sequía es un fenómeno de gran importancia para la planeación y gestión de los recursos hídricos. Este capítulo introduce los aspectos fundamentales para su atención, considerando para ello su definición y tipología, los índices más comunes para su detección (univariados y multivariados) y los esfuerzos globales y nacional emprendidos para su monitoreo.

#### 2.1.1. Definición general

La sequía es un fenómeno climático natural y recurrente, que ocurre virtualmente en todos los regímenes climáticos (Wilhite, 2000) pero que se presenta con mayor frecuencia en zonas áridas y semiáridas (Rakhecha y Singh, 2009). La Sociedad Meteorológica Americana define a la sequía como “un periodo de clima anormalmente seco cuya duración es suficientemente prolongada como para causar desequilibrios hidrológicos significativos” (AMS, 2016). En términos generales, la mayoría de las definiciones que ofrece la literatura en el tema concuerdan con la citada.

La disponibilidad de agua en una región depende en gran medida de la cantidad de lluvia o nieve que ésta recibe. El régimen de lluvia de una región se define en función del promedio de la precipitación total que cae dentro de su superficie durante un periodo de tiempo. No obstante, en análisis anuales esta cantidad es altamente variable dado que la precipitación acumulada durante un periodo en particular, no depende de la registrada en el mismo periodo para otro año cualquiera. En términos estadísticos, los elementos que conforman una serie de tiempo anual de precipitación no guardan una correlación entre sí, lo que le da la calidad de *independiente* a la serie. Lo anterior permite la ocurrencia de periodos de déficit de lluvia y periodos de superávit.

Una vez iniciado un periodo de sequía, se activa un ciclo de interacciones físicas que dan lugar a la caída del contenido de humedad en las capas más superficiales del suelo, lo que a su vez provoca la disminución de la tasa de evapotranspiración y reduce la humedad relativa de la atmósfera. El grado reducido de humedad relativa, impide alcanzar las condiciones de saturación de humedad en la atmósfera, de modo que es menos probable la precipitación. Este ciclo de interacciones se termina una vez que una perturbación atmosférica importa humedad suficiente desde otras regiones geográficas, de tal suerte que el agua se precipita en forma líquida o sólida dentro de la región seca que padece el fenómeno (Bravar y Kavvas, 1991; Mishra y Singh, 2010).

Además de los factores climáticos, el déficit de agua puede estar asociado a actividades humanas tales como (Maracchi, 2000):

- (a) incremento del uso del agua, así como el aumento en la competencia por el recurso entre varios sectores económicos (*e. g.*, agricultura, industria o turismo);
- (b) cambios en el manejo y uso del suelo;
- (c) decaimiento en la calidad del agua por malas prácticas en el manejo del agua residual;
- (d) falta de tecnología para optimizar el uso del agua.

En virtud de que el déficit de agua puede darse como resultado de variaciones climáticas naturales o en respuesta a actividades antropogénicas, estudios recientes identifican la necesidad de distinguir entre *sequía* y *escasez hídrica* (van Loon y van Lanen, 2013). La sequía corresponde a una amenaza natural producida por la variabilidad climática de gran escala, y su ocurrencia no puede ser prevenida por la gestión local del agua. Mientras que la escasez hídrica se refiere al uso no sostenible del agua en el largo plazo, sobre la que las autoridades locales si tienen influencia directa. Ambos fenómenos pueden ocurrir de forma simultánea, por lo que la distinción entre sequía y escasez hídrica no es trivial y han sido

desarrollados marcos de trabajo específicamente para ello (van Loon y van Lanen, 2013). El presente trabajo de tesis hace énfasis en la sequía como amenaza natural que tiene un impacto directo, sobre los ecosistemas y la sociedad en diversas maneras.

### 2.1.2. Tipos de sequía

Dada la naturaleza compleja de la sequía, su definición general resulta insuficiente para describir toda la variedad de tipos e impactos asociados a su ocurrencia. Lo anterior motivó a Subrahmanyam (1967) a definir seis tipos diferentes de sequía, a saber: meteorológica, climatológica, atmosférica, agrícola, hidrológica, y de gestión del agua. Posteriormente, algunos autores incluyeron aspectos socioeconómicos en el estudio de la sequía (Gibbs, 1975; Guerrero Salazar y Yevjevich, 1975). Además, debido a la gran diferencia entre el tiempo de reacción de los componentes superficiales del sistema hidrológico y los componentes subterráneos ante un déficit de agua, se ha reconocido la necesidad de hacer una distinción particular dentro de la sequía hidrológica para considerar este aspecto (Mishra y Singh, 2010; van Lanen y E. Peters, 2000). Esto ha dado como resultado que en la actualidad los tipos de sequía más reconocidos sean (Mishra y Singh, 2010; Wilhite y Glantz, 1985):

- sequía meteorológica,
- sequía agrícola (o agropecuaria),
- sequía hidrológica,
- sequía hidrogeológica, y
- sequía socioeconómica.

Las primeras cuatro tipologías corresponden a déficits identificados en parámetros físicos, hidrometeorológicos o biológicos, mientras que la última se asocia a los impactos de la sequía sobre las actividades económicas de la sociedad. Cada una de estas clasificaciones, evalúa la severidad del fenómeno en función de distintos criterios e indicadores. Con el propósito de explicar la razón de ser detrás de esta clasificación, es necesario incorporar la descripción del proceso conocido como *propagación de la sequía*, que explica la relación que guardan los diferentes tipos de sequía entre sí.

La Figura 2.1 presenta un esquema que describe el proceso de propagación, donde se identifican por bloques las variables e impactos asociados a cada tipo de sequía.

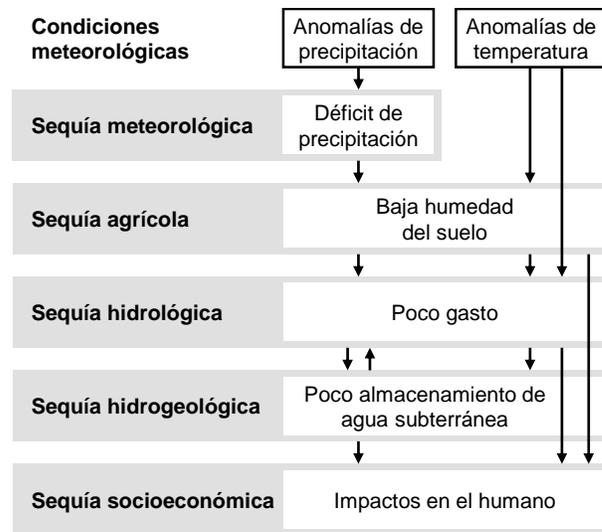


Figura 2.1: Diferentes categorías de sequía y su desarrollo (modificado de van Loon (2015)).

La forma más simple de representar el inicio de una sequía es a partir de la identificación de un periodo de déficit de lluvia, a lo que se le conoce como *sequía meteorológica*.

La sequía meteorológica da lugar a la disminución en el contenido de agua en las capas más superficiales del suelo debido al proceso de evapotranspiración. Diversos estudios han documentado los impactos negativos de esto en ecosistemas naturales e infraestructura (Corti *et al.*, 2009; van der Molen *et al.*, 2011; Seneviratne *et al.*, 2012). Sin embargo, los efectos más inmediatos se observan en el deterioro de la calidad de la producción agrícola y la reducción del volumen producido debido a que el bajo contenido de humedad del suelo resulta insuficiente para satisfacer la demanda de agua de las plantas. Es por esto que se identifica a este déficit como un indicador clave de la *sequía agrícola*.

Al inicio de una sequía, la agricultura es de las primeras actividades afectadas, ya que el contenido de agua en el suelo es el primer componente del sistema hidrológico en resentir la reducción del ingreso de agua. Del mismo modo, si la lluvia vuelve a ocurrir, los niveles de humedad de suelo se recuperan en un periodo muy breve de tiempo. Por lo tanto, en cultivos de temporal la sequía agrícola termina de manera abrupta. A pesar de esto, el impacto de la sequía en la producción agrícola se registra tiempo después de terminar el periodo seco y su severidad está en función del momento en que el periodo seco ocurrió con respecto a la etapa de crecimiento del cultivo (Wilhite, 2000).

Por otro lado, si el déficit de lluvia continúa, la siguiente afectación que se observa en el sistema terrestre se da a nivel cuenca y corresponde a una disminución de la cantidad de agua que fluye por los cauces naturales, a esto se le conoce como *sequía hidrológica*. En este

sentido, se aprecia una reducción en los flujos y niveles de cuerpos de agua presentes en la región de análisis.

Por lo general, la sequía hidrológica se presenta un tiempo después de la meteorológica y la agrícola, en virtud de que un déficit prolongado de lluvia produce una disminución en la entrada de agua al sistema hidrológico. Posteriormente, este déficit de agua superficial en las cuencas induce el abatimiento en los niveles de agua en los acuíferos, cuyos niveles freáticos descienden por influencia de la falta de lluvia en forma directa (falta de recarga) o indirecta (intensificación de su explotación por agotamiento de fuentes superficiales). Este déficit de agua en los almacenamientos subterráneos, es de gran importancia para las autoridades encargadas de la gestión del agua y se le conoce como *sequía hidrogeológica* (Mishra y Singh, 2010).

La propagación de la sequía desde la superficie del suelo, no siempre alcanza a los almacenamientos subterráneos. Sin embargo, cuando esto sucede es común que el nivel freático descienda hasta profundidades mayores a la normal durante varios meses o años después de terminar el déficit de lluvia (van Loon, 2015). En este sentido, los efectos de la sequía a lo largo de las diferentes etapas del ciclo hidrológico avanzan desde la atmósfera, hasta las partes superficial y subterránea de las cuencas, retrasándose en el tiempo de acuerdo a su velocidad de propagación en el sistema terrestre y el tiempo de residencia en cada etapa. De esta manera, la sequía en los acuíferos se detecta con un retraso temporal considerable, respecto a la componente meteorológica.

Si esta cadena de efectos ocurre en una región poblada o en la que existe infraestructura para el aprovechamiento de recursos hídricos (*e. g.*, presas), es natural que el abastecimiento de agua para las distintas actividades humanas sea gravemente afectado (Rakhecha y Singh, 2009). Una vez registradas las afectaciones al suministro de agua para actividades humanas, se determina la presencia de la *sequía socioeconómica*.

El Cuadro 2.1 muestra una lista de los impactos socioeconómicos y el tipo de sequía al que se encuentran asociados. El funcionamiento u operación de los elementos contenidos en esta tabla, depende del estado del clima y su demanda aumenta como resultado del crecimiento de la población o del consumo *per capita*. Por lo tanto, se puede definir a la sequía socioeconómica como aquella que ocurre cuando la demanda de agua derivada de las actividades antropogénicas excede al suministro normal que resulta del ciclo hidrológico, resultado de los efectos de un fenómeno climático (Sandford, 1979).

En la realidad, la secuencia de propagación puede ser más compleja. Por ejemplo, una sequía hidrológica puede desarrollarse sin necesidad de verse precedida directamente por una

Cuadro 2.1: Mayores impactos de las sequías en relación con sus diferentes categorías (modificado de van Loon, 2015).

| Sector económico impactado | Tipo de sequía |          |             |                |
|----------------------------|----------------|----------|-------------|----------------|
|                            | Meteorológica  | Agrícola | Hidrológica | Hidrogeológica |
| Agricultura de temporal    | X              | X        |             |                |
| Agricultura con irrigación |                | X        | X           | X              |
| Generación hidroeléctrica  |                |          | X           |                |
| Enfriamiento industrial    |                |          | X           | X              |
| Navegación                 |                |          | X           |                |
| Agua potable               |                |          | X           | X              |
| Recreación                 |                |          | X           |                |

sequía meteorológica. Éste sería el caso de una reducción del flujo en un cauce o del nivel en un embalse en la parte baja de una cuenca como consecuencia de una sequía meteorológica en su parte alta, sin haberla padecido de forma local. Además, una sequía hidrológica puede ser detonada también por anomalías en la temperatura, tales como condiciones gélidas prolongadas que se observan durante el invierno en cuencas cuyo mayor escurrimiento proviene del deshielo. Tal y como lo explican van Loon y van Lanen (2012) y van Loon, Ploum *et al.* (2014), existen ocho diferentes procesos de propagación para la generación de sequía hidrológica.

## 2.2. Cuantificación de sequías

### 2.2.1. Características de las sequías

En la literatura, existen algunas diferencias respecto a los términos utilizados para los rasgos que caracterizan a una sequía. Sin embargo, las diferencias son de tipo semántico y no sobre los procesos que describen al fenómeno. Por ejemplo, Salas (1993) y Tsakiris *et al.* (2007) definen la *intensidad* como la proporción entre la *magnitud* y la *duración* del déficit de humedad, mientras que Wilhite (2007) la refiere como “el grado del déficit de precipitación y/o la severidad de los impactos asociados con el déficit”. Dada la ambigüedad de algunos conceptos en la literatura, en esta sección se presentan las definiciones empleadas en el presente estudio.

En términos generales, los periodos de déficit en una serie de tiempo pueden ser caracterizados con base en tres rasgos elementales (Salas, 1993): *duración*, *magnitud* e *intensidad*. Estos rasgos, sirven de punto de partida para establecer una metodología para cuantificar las sequías. Además, dado que los efectos de este fenómeno están íntimamente ligados con

el tamaño del área con déficit, es importante definir la *distribución espacial* dentro de la que se desarrollan. Por ejemplo, cuántos píxeles (o celdas de una malla de cálculo) presentan déficit de humedad, en cuántas cuencas se ha observado la reducción del escurrimiento o cuántos municipios o regiones han visto afectadas sus actividades económicas por la falta de agua. Existen otros rasgos auxiliares para caracterizar una sequía, como la *frecuencia* (periodo de retorno) (Zargar *et al.*, 2011) y el *momento de ocurrencia* (AMS, 2013). A continuación, se definen los conceptos principales para describir a las sequías.

**Duración.** Usualmente, las sequías requieren un mínimo de dos a tres meses para establecerse (Wilhite, 2000; Wilhite, 2007) y su duración puede extenderse por un tiempo tan corto como unos cuantos meses o persistir varios años o, incluso, décadas, a lo que se le denomina *megasequía* (Stahle *et al.*, 2007). Por otro lado, es necesario diferenciar a las sequías de las ondas de calor, ya que estas últimas se encuentran asociadas a escalas temporales mucho más cortas y corresponden a duraciones del orden de una semana (Chang y Wallace, 1987).

**Magnitud.** Se refiere al déficit de agua (*e. g.*, precipitación, humedad de suelo o escurrimiento) alcanzado por debajo de cierto valor umbral durante un periodo de sequía.

**Intensidad.** Se refiere a la proporción que existe entre la magnitud ( $M$ ) de la sequía y su duración ( $L$ ), es decir:

$$I = \frac{M}{L}$$

**Severidad.** Es el grado de los impactos asociados con el déficit. Los *impactos* son los efectos que tiene un evento de sequía en los sectores económicos y sociales de una comunidad o en ecosistemas naturales. El grado de dichas afectaciones está íntimamente relacionado con el momento de inicio de la escasez de agua. Su intensidad se mide en términos monetarios (pérdidas tangibles). Sin embargo, existen un sinnúmero de impactos ambientales y sociales que carecen de un valor económico (pérdidas intangibles), lo que hace muy difícil su cuantificación (Hernández-Mora *et al.*, 2013).

**Distribución espacial.** Es la extensión geográfica de la sequía. De forma natural, el área afectada es variable durante el evento y puede ser tan pequeña como unos cuantos municipios, o tan extensa que cubra gran parte de un continente. Un ejemplo de sequía extensa se observó durante el evento conocido como *Dust Bowl* (Tazón de Polvo), que se registró en gran parte del territorio norteamericano durante la década de 1930 (Schubert *et al.*, 2004; B. I. Cook, Miller y Seager, 2009).

**Frecuencia.** Está definida como el tiempo en el que la probabilidad de que ocurra un evento de sequía de magnitud igual o mayor que cierto umbral tiende a la unidad,

según el registro de eventos pasados.

**Momento de ocurrencia.** Este aspecto caracteriza a una sequía por la principal estación de ocurrencia (*e. g.*, primavera, verano, etc.), retrasos en el inicio de la temporada de lluvias u ocurrencia de las lluvias en relación con las etapas principales de crecimiento de los cultivos.

Dado que las sequías son un evento climático y que nos encontramos bajo condiciones de un clima que está cambiando, es posible anticipar que la duración, magnitud, intensidad, severidad, frecuencia y distribución espacial de las sequías se vean modificadas en el futuro. De hecho, existen diversos estudios a nivel global que pronostican que, como resultado del calentamiento global, se tendrán sequías más frecuentes e intensas (*e. g.*, Hirabayashi *et al.*, 2008). Adicionalmente, estudios como el de Seneviratne *et al.* (2012) indican que alteraciones en fenómenos climáticos periódicos como la Oscilación del Sur-El Niño o los monzones también pueden afectar la frecuencia e intensidad de las sequías.

### 2.2.2. Indicadores e índices de sequía

Una de las funciones más importantes de la ingeniería consiste en estudiar y comprender los eventos extremos (*e. g.*, sequías), de tal manera que a través de su conocimiento sea posible la generación de estrategias de mitigación de los efectos negativos que éstos producen. En el caso de la sequía, ejemplos de labores importantes por parte de la ingeniería son el desarrollo de sistemas de abastecimiento de agua que sean capaces de operar en condiciones de déficit con mínimas afectaciones (Neal y Moran, 2009), o la producción de herramientas que ayuden a los tomadores de decisiones a activar mecanismos de respuesta ante la incidencia de un evento extremo (Travis y Klein, 2012). Estas labores requieren establecer criterios objetivos y precisos, que permitan identificar el inicio y terminación de una sequía de tal suerte que sea posible determinar su intensidad, magnitud y severidad (Wilhite, 2000) de una forma confiable. Sin embargo, definir estas características es complicado dados el inicio paulatino del fenómeno y su extensa duración. Más aun, la naturaleza no visible de la sequía, junto con la amplia extensión geográfica del área que afecta, dificulta la identificación de impactos visibles debidos al fenómeno (Travis y Klein, 2012), los cuales se registran tiempo después de su ocurrencia.

La forma más común para evaluar las sequías es a través de *indicadores e índices de sequía* (Tsakiris *et al.*, 2007). Los indicadores de sequía son parámetros utilizados para describir las variaciones respecto al comportamiento normal de las variables involucradas (WMO

y GWP, 2016). Por otra parte, los *índices de sequía* son valores numéricos que sirven de referencia para evaluar la severidad del periodo seco. Estos índices representan una importante herramienta para la toma de decisiones, y se estiman a través de variables meteorológicas (*e. g.*, precipitación, cobertura nubosa) e hidrológicas (*e. g.*, flujo en cauces, nivel del agua subterránea, almacenamiento en cuerpos de agua), entre otras, de tal manera que a través de su determinación, sea posible la adecuada caracterización y gestión del riesgo debido a este fenómeno. De acuerdo con Zargar *et al.* (2011), entre las actividades más importantes que son posibles a través del uso de estos índices, se encuentran:

- detección de sequías y monitoreo en tiempo real;
- determinación del inicio y terminación de un periodo de sequía;
- justificación objetiva de la activación de medidas de respuesta ante estos eventos;
- análisis comparativo de los impactos cuantitativos de varios eventos a diferentes escalas espaciales y temporales; y
- comunicación eficaz de las condiciones de sequía a la sociedad.

Una adecuada utilización de los índices de sequía, requiere definir umbrales que sirvan para la distinción entre las condiciones “normales” y el déficit en una variable, así como para determinar su severidad. Los valores que se definen como umbrales, atienden criterios como la respuesta de la vegetación o el flujo en un cauce ante una reducción de la precipitación (ver, por ejemplo, el estudio de Changnon Jr., 1987). Esto permite a los tomadores de decisión, contar con una definición operativa de la sequía para la zona de interés. Sin embargo, dada la gran diversidad climática en el planeta, el valor umbral definido para una región puede ser inadecuado y poco representativo para otra. Por esto, las definiciones operacionales de sequía deben ser formuladas de manera específica por región y en función de los impactos que se desean evaluar. La siguiente lista presenta un ejemplo de estas diferencias, respecto a la definición de la sequía meteorológica en diferentes partes del mundo (Bryant, 2005; Wilhite y Glantz, 1985).

- Un periodo de 30 días sin precipitación (Canadá).
- Un año en el que la lluvia acumulada es inferior al 10 % de los registros históricos (Australia).
- Un periodo de 15 días seguidos en los que la lluvia diaria no haya alcanzado 0.25 mm (Gran Bretaña).

- Un año en el que la lluvia acumulada sea menor que 180 mm (Libia).

En contraste, en México el criterio seguido para la activación de la asistencia económica a zonas afectadas por sequía meteorológica contiene las siguientes condiciones (DOF 31/01/2011):

1. que, al menos en el ciclo de lluvias previo, se haya presentado un déficit de lámina acumulada en superficie que tenga una probabilidad de ocurrencia igual o menor que diez por ciento de acuerdo a los datos con los que cuenta la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), para el o los municipios de que se trate; y
2. que no se haya presentado esta situación en cinco o más de los últimos diez años.

Adicionalmente, las definiciones operacionales de sequía hidrológica tienen su base en el volumen de flujo en cauces o en los niveles de presas y lagos. Para corrientes perennes se define a partir de los déficits identificados en estas variables, que están en función de los percentiles de la curva gasto-duración del cauce (entre el percentil 75 y 90). Mientras que para su identificación en corrientes efímeras, se utiliza el criterio que consiste en la cantidad de días (o meses) con flujo nulo para definir el inicio de un periodo de sequía (van Loon, 2015).

En la literatura existe una gran variedad de índices de sequía y maneras de clasificarlos (pueden encontrarse algunas revisiones al respecto en Tsakiris *et al.* (2007), Zargar *et al.* (2011) y Hao y Singh (2015)). De acuerdo con Hisdal y Tallaksen (2000), una clasificación que permite la organización de estos índices de acuerdo a su utilidad operacional es la que presentan Mawdsley, Petts y S. Walker (1994) quienes identifican las siguientes dos clases de índices:

**Índices ambientales.** Son aquellos índices hidrometeorológicos e hidrológicos que miden el efecto directo en el ciclo del agua. La naturaleza del déficit de agua puede ser relacionada con la precipitación, flujo en cauces o humedad del suelo. Pueden ayudar a identificar la duración y severidad de una sequía, así como su frecuencia. Generalmente, las definiciones de sequía desde el punto de vista ambiental determinan el grado de desviación a partir de condiciones promedio.

**Índices de recursos hídricos.** Miden la severidad de la sequía en términos de su impacto en el uso del agua. Por ejemplo, impactos en el abastecimiento de agua para uso doméstico o agrícola, impactos en la recarga, extracción y niveles de fuentes de abastecimiento, impactos en la pesca o en usos recreativos del agua. En este contexto, se

reconoce la influencia de prácticas humanas en la determinación de la sequía, tales como incrementos en la demanda de agua o manejo inadecuado del recurso.

Los índices ambientales pueden ser subdivididos con base en la cantidad de indicadores que emplean (Hisdal y Tallaksen, 2000). Bajo esta óptica, los *índices univariados* o simples evalúan el déficit de humedad en función de una sola variable (*e. g.*, déficit de lluvia o de flujo en cauces). Análogamente, los *índices multivariados* o complejos incluyen varios elementos del ciclo hidrológico en la caracterización de la sequía (*e. g.*, una combinación de indicadores meteorológicos, como precipitación y evapotranspiración).

De forma complementaria, Niemeyer (2008) identificó otros grupos de índices: integrales y de percepción remota. Los *índices integrales* usan conjuntamente indicadores de distintas disciplinas (*i. e.*, indicadores meteorológicos, agrícolas, hidrológicos, socioeconómicos) para obtener un panorama amplio de la sequía. Mientras que los *índices de percepción remota* emplean información extraída de productos de sensores remotos para caracterizar geográficamente las condiciones del suelo.

La elección de los índices de sequía y su implementación, son tareas de gran relevancia ya que cada implementación o selección podría resultar en conclusiones diferentes. Sin embargo, no existe tal cosa como un “índice óptimo”. La aplicabilidad de un índice dependerá del conocimiento previo que exista sobre el caso de estudio, las necesidades del usuario final, la disponibilidad de datos y los recursos computacionales disponibles para su implementación (WMO y GWP, 2016). Por otro lado, al ser una amenaza natural compleja, la sequía es mejor caracterizada por múltiples parámetros climatológicos e hidrológicos (Mishra y Singh, 2010), por lo que actualmente la tendencia internacional está orientada al manejo conjunto de distintos índices, de tal suerte que se puedan evaluar diferentes procesos que determinan el inicio de una sequía (van Loon, 2015). En los siguientes apartados se hará una revisión de los índices de sequía más usados.

### Índices univariados de sequía

**Deciles de lluvia.** Gibbs y Maher (1967) propusieron un sistema basado en deciles para monitorear la sequía meteorológica, que compara la lluvia mensual acumulada con valores promedio extraídos de los registros históricos. El método usa deciles de precipitación, que son creados a partir de la serie de datos observados de precipitación, ordenada de manera ascendente. Un sitio estará afectado por sequía cuando la precipitación se encuentre por debajo del primer decil durante tres meses consecutivos (Kinninmonth *et al.*, 2000). La terminación de un periodo seco es determinada cuando se dé una de las siguientes dos

condiciones (Wanders, van Lanen y van Loon, 2010):

- a) se presenta un mes en el que la precipitación acumulada supere al cuarto decil; o
- b) que la lluvia acumulada de tres meses consecutivos se encuentre por encima del octavo decil.

El Servicio de Observación de Sequías de la Agencia Australiana de Meteorología agregó un tercer criterio para definir la terminación de un periodo seco (Keyantash y Dracup, 2002): si la precipitación total desde el inicio de la sequía excede el primer decil para la distribución correspondiente a todo el periodo seco, puede considerarse finalizada la sequía meteorológica.

Generalmente, el método de los deciles considera solo el 10 % inferior de la distribución de datos para caracterizar la deficiencia de lluvia como *severa*, indicando el 5 % inferior de los registros de lluvia, y *seria* para el segundo 5 % inferior (Zargar *et al.*, 2011).

**Fortalezas.** La metodología es simple y flexible; representa una medida estadística precisa; coloca los datos actuales dentro de un contexto histórico mediante umbrales claramente definidos, lo que facilita la identificación de las sequías; es útil en condiciones secas y húmedas (WMO y GWP, 2016).

**Limitaciones.** La influencia de la temperatura y otros indicadores no es considerada durante el desarrollo de la sequía; requiere registros de precipitación extensos para realizar una evaluación más precisa de la intensidad de la sequía (Tsakiris *et al.*, 2007; WMO y GWP, 2016).

**Porcentaje de la precipitación normal.** Se desconoce el origen de su uso como índice de sequía (WMO y GWP, 2016), pero es una de las medidas más simples para evaluar la desviación de la lluvia de su media a largo plazo, por lo que es ampliamente usado por el público general (Tsakiris *et al.*, 2007). *La normal* es la medida de las condiciones climáticas “típicas”. Se calcula como un promedio temporal no ponderado de un periodo de 30 años consecutivos (Arguez y Vose, 2011) y puede ser determinada para un mes, una temporada o un año. Al aplicarse debe tomarse en cuenta que un porcentaje dado de la normal puede asociarse a distintos impactos en diferentes sitios, por lo que se recomienda su implementación para hacer comparaciones dentro de una sola región o temporada.

**Fortalezas.** Su cálculo es muy sencillo y requiere un nivel muy básico de matemáticas (WMO y GWP, 2016).

**Limitaciones.** La normal puede ser definida de manera distinta en diferentes regiones; es difícil realizar comparaciones entre diferentes regímenes climáticos, especialmente aquellos con temporadas húmeda y seca bien definidas; en la realidad, la precipitación no presenta una distribución normal (Tsakiris *et al.*, 2007; WMO y GWP, 2016).

**Déficit total de agua.** Este índice, también conocido como la severidad de sequía (S), es una evaluación tradicional para la sequía hidrológica. Es el producto de la duración (D) o tiempo en que el flujo se encuentra por debajo de cierto nivel umbral y la magnitud (M), que es la desviación promedio que tiene el flujo a partir del nivel umbral durante el periodo seco (Dracup, Lee y Paulson Jr., 1980; Keyantash y Dracup, 2002). Al terminar la sequía, el déficit total de agua regresa a cero.

**Fortalezas.** Su cálculo es muy sencillo.

**Limitaciones.** Las condiciones del flujo pueden variar entre las distintas subcuencas de la corriente analizada, por lo que se pierde detalle al aplicarse en cuencas grandes (Keyantash y Dracup, 2002).

**Índice Estandarizado de Precipitación (SPI).** El SPI, desarrollado por McKee, Doesken y Kleist (1993), es uno de los índices más usados y ha sido recomendado por el Taller Interregional de Índices y Sistemas de Alerta Temprana para la Sequía (WMO, 2009) para su uso en todos los servicios meteorológicos nacionales. Describe las condiciones de precipitación relativas a la climatología de largo plazo. Para calcularlo es necesaria una serie temporal mensual de precipitación, idealmente continua y de, al menos, 30 años de extensión. No obstante Guttman (1999) recomendó series de 50 años. El índice es calculado para una escala temporal (ventana móvil de promediado), que puede ser de  $i = 3, 6, 12$  meses, etc. Estos periodos –arbitrarios– deben ser representativos del tiempo que tarda el déficit de precipitación en afectar a la humedad del suelo, agua subterránea, la acumulación de nieve, flujo en cauces o almacenamiento en cuerpos de agua. El Cuadro 2.2 muestra distintas escalas temporales y sus efectos relacionados (NDMC, 2016).

El conjunto de datos para su cálculo es la serie temporal de precipitación completa, y cada elemento del conjunto de datos será la suma de los  $i$  meses previos. Si se toma como ejemplo una escala temporal de análisis de 3 meses, éste índice ofrecerá una comparación de la precipitación de un periodo específico de tres meses con respecto a los totales de precipitación del mismo periodo de tres meses para todos los años incluidos en el registro histórico (WMO, 2012). Es decir, el SPI<sub>03</sub> al finalizar febrero compara la precipitación total

Cuadro 2.2: Fenómenos reflejados en cada escala temporal del SPI y sus aplicaciones (NDMC, 2016; WMO, 2012).

| Escala temporal              | Aplicación e interpretación  |
|------------------------------|--|
| SPI <sub>01</sub> (1 mes)    | Sequías de tipo meteorológico, junto con estrés de humedad del suelo y cultivos a corto plazo, especialmente durante la etapa de desarrollo. |
| SPI <sub>03</sub> (3 meses)  | Estimación estacional de precipitación. Es un indicador de las condiciones de humedad del suelo.   |
| SPI <sub>06</sub> (6 meses)  | Precipitación a lo largo de distintas estaciones. Anomalías en flujos en cauces y niveles en almacenamientos.                                |
| SPI <sub>09</sub> (9 meses)  | Impactos en la agricultura.  |
| SPI <sub>12</sub> (12 meses) | Impactos en flujos en cauces, cuerpos de agua y acuíferos.   |

Cuadro 2.3: Categorías de intensidad de sequía para el SPI (McKee, Doesken y Kleist, 1993).

| Rango                         | Categoría       |
|-------------------------------|-----------------|
| $0.0 \geq \text{SPI} > -1.0$  | Sequía leve     |
| $-1.0 \geq \text{SPI} > -1.5$ | Sequía moderada |
| $-1.5 \geq \text{SPI} > -2.0$ | Sequía severa   |
| $\text{SPI} \leq -2.0$        | Sequía extrema  |

de diciembre-enero-febrero en el año de interés con los totales de precipitación de diciembre-enero-febrero de todos los años en el registro.

La serie temporal resultante es ajustada a la función Gamma para definir una relación de probabilidad de precipitación y calcular la probabilidad asociada a cada elemento. A continuación, se obtiene la inversa de la normal para determinar la desviación de precipitación de cada valor para una densidad de probabilidad normalmente distribuida con media en 0 y desviación estándar de 1. El resultado será el SPI para cada periodo.

Dentro de esta metodología, se considera como sequía a un periodo continuo de valores negativos del SPI en el que se haya alcanzado al menos un valor inferior o igual que  $-1.0$ . El inicio de la sequía es determinado en el mes correspondiente al primer valor negativo del SPI. El final de la sequía se define en el siguiente mes con valor positivo. La intensidad de la sequía es definida arbitrariamente según la categoría mostrada en el Cuadro 2.3.

Además, es posible determinar la magnitud de la sequía ( $M$ ) como sigue (McKee, Doesken y Kleist, 1993):

$$M = - \left( \sum_{i=1}^n \text{SPI}_i^{(ts)} \right) \quad (2.1)$$

donde  $i$  inicia con el primer mes de una sequía y continua hasta el último mes del periodo seco ( $n$ ) para la escala temporal  $ts$ . La magnitud, calculada mediante la Ecuación 2.1 tiene

unidades de meses y es numéricamente equivalente a una duración de sequía si cada mes de este periodo presentara un valor de  $SPI = -1.00$ .

**Fortalezas.** Su cálculo es sencillo; aplicable en todos los regímenes climáticos; puede ser calculado para múltiples escalas temporales (Tsakiris *et al.*, 2007; WMO y GWP, 2016).

**Limitaciones.** No toma en cuenta el componente de la temperatura para la caracterización de un periodo seco; presupone una distribución de probabilidad (Gamma) (WMO y GWP, 2016).

**Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI).** El NDVI es un índice basado en sensores remotos que determina el estrés hídrico de la vegetación. Usa los canales rojo y cuasi infrarojo del radiómetro avanzado de muy alta resolución (AVHRR) para calcular si la vegetación es saludable o poco saludable y dispersa (*e. g.*, sufriendo de una sequía o plaga). La fórmula para calcular el índice es la siguiente (Zargar *et al.*, 2011):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (2.2)$$

donde  $NIR$  es la reflectancia espectral cuasi infraroja y  $R$  es la reflectancia espectral roja visible. En condiciones sanas de la vegetación, la clorofila (sustancia verde que produce carbohidratos en las plantas) absorbe la luz, reflejando menos  $R$ . Valores menores de  $R$  dan como resultado un valor alto de NDVI. Las plantas no saludables reflejan más  $R$ , lo que resulta en un valor bajo de NDVI.

**Fortalezas.** Tiene una amplia cobertura y alta resolución (WMO y GWP, 2016).

**Limitaciones.** Requiere un sistema robusto de cómputo para el procesamiento de datos; usa datos de satélite, de los que no existen registros históricos extensos (WMO y GWP, 2016).

### Índices multivariados de sequía

Los indicadores univariados pueden no ser suficientes para caracterizar condiciones complejas de sequía, por ejemplo, la ocurrencia simultánea de dos tipos distintos de sequía (Hao y Singh, 2015). En este sentido, una perspectiva multivariada permite combinar múltiples indicadores para evaluar distintos aspectos de un periodo de déficit y asimilarlos en un único índice.

**Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI).** El PDSI (Palmer, 1965) fue el primer índice multivariado desarrollado en E.U.A. y es uno de los más frecuentemente aplicados en ese país (Hisdal y Tallaksen, 2000). Fue concebido para la caracterización de la sequía meteorológica; sin embargo, ha sido ampliamente aplicado para identificar la sequía agrícola. Ofrece una medida de la anormalidad del clima reciente, a través de la oferta de humedad en una región y ubica dichas condiciones actuales en un contexto histórico. A partir de las variables meteorológicas de precipitación, temperatura y capacidad disponible de agua<sup>1</sup> en el suelo local, calcula la oferta de humedad con base en el balance de agua en un modelo de suelo de dos capas. De esta manera estima la evapotranspiración, escurrimiento y recarga del suelo. La metodología para su cálculo puede ser consultada en detalle en Palmer (1965). A continuación se sintetizan el procedimiento para su cálculo.

1. Recopilar las series de tiempo mensuales de las variables hidrológicas necesarias (*i. e.*, temperatura, precipitación, evapotranspiración potencial y capacidad disponible de agua) y realizar el balance de agua.
2. Obtener ciertas constantes o coeficientes que dependen del clima del área analizada.
3. Reanalizar las series temporales usando los coeficientes calculados para determinar la cantidad de humedad requerida para un clima “normal” durante cada mes.
4. Convertir las desviaciones a índices de anomalía de humedad.
5. Analizar la serie de índices para desarrollar:
  - criterios para determinar el inicio y final de periodos secos; y
  - una fórmula para determinar la severidad de la sequía.

**Fortalezas.** El uso de datos de suelo y su metodología de balance de agua total lo hace robusto. Es particularmente efectivo para detectar sequías agrícolas debido a que emplea datos de humedad del suelo (Tsakiris *et al.*, 2007; WMO y GWP, 2016).

**Limitaciones.** Tiene una escala temporal de aproximadamente nueve meses, lo que conduce a un retraso en la identificación de condiciones de sequía y lo pone en desventaja frente a otros índices durante una situación de sequía de inicio rápido (Tsakiris *et al.*, 2007; WMO y GWP, 2016); la cuantificación de la intensidad, así como la definición del inicio y terminación de una sequía fueron seleccionados subjetivamente con base en un estudio en Iowa y Kansas (E. U. A.), por lo que no son representativos de otros sitios.

---

<sup>1</sup>Capacidad de agua disponible: agua retenida en el suelo entre su capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (NRCS ENTSC, 2011).

**Anomalía de Humedad del Suelo (SMA).** El índice de Anomalía de Humedad del Suelo fue desarrollado por Bergman, Sabol y Miskus (1988) como una forma de evaluar las condiciones globales de sequía. Requiere datos semanales o mensuales de precipitación y temperatura para calcular la evapotranspiración potencial y llevar a cabo un balance hídrico. Tiene como objetivo reflejar el grado de sequedad o saturación del suelo comparado con las condiciones normales y mostrar la forma en que el estrés de humedad del suelo ejerce una influencia en la producción de los cultivos en todo el mundo. Es extensamente usado para monitorear los impactos de la sequía en la agricultura y la producción de los cultivos.

**Fortalezas.** Considera la humedad de distintas capas del suelo y es más adaptable que el PDSI a diferentes localizaciones.

**Limitaciones.** Las estimaciones de evapotranspiración potencial pueden variar significativamente en distintas regiones.

**Índice de Humedad de Cultivo (CMI).** Este índice fue desarrollado por Palmer (1968) como un complemento del PDSI. Es más sensible a cambios a corto plazo en las condiciones de humedad y, por lo tanto, es más útil para la interpretación de sequías agrícolas. Mide el grado en que son satisfechos los requerimientos de humedad de los cultivos en etapa de crecimiento (Tate y Gustard, 2000) mediante un balance simple de humedad. El CMI es la suma de un déficit de evapotranspiración (con respecto a las condiciones normales) y la recarga de agua del suelo, términos calculados semanalmente usando los parámetros del PDSI. Es capaz de evaluar las condiciones presentes para los cultivos pero su gran sensibilidad ante variaciones rápidas en la precipitación lo posicionan como una pobre herramienta para el monitoreo de sequías a largo plazo (Tsakiris *et al.*, 2007).

**Fortalezas.** Tiene una gran efectividad para medir la sequía agrícola durante las estaciones cálidas (*i. e.*, temporadas de crecimiento del cultivo) (Mishra y Singh, 2010); es de gran aplicación para predecir sequías de corto plazo (Wanders, van Lanen y van Loon, 2010).

**Limitaciones.** Requiere datos semanales de temperatura y precipitación; no es aplicable en cultivos en etapa de germinación, de raíces poco profundas, o aquellos que se desarrollan en temporadas frías (Tate y Gustard, 2000); la rápida respuesta ante los cambios a corto plazo en las condiciones de humedad (*i. e.*, lluvia) puede provocar información errónea acerca de las condiciones a largo plazo (Mishra y Singh, 2010).

**Índice Multivariado Estandarizado de Sequía (MSDI).** Hao y AghaKouchak (2013) propusieron este método multivariado que combina la información de dos o más variables por medio de la función de su distribución de probabilidad conjunta. La base de su cálculo es la misma que la del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI; McKee, Doesken y Kleist, 1993), por lo que es capaz de caracterizar las sequías en diferentes escalas temporales.

La función de distribución conjunta es derivada a partir de cópulas. Suponiendo dos variables asociadas con la sequía como las variables aleatorias  $X$  y  $Y$ , respectivamente, la distribución de la probabilidad conjunta acumulada  $p$  puede ser expresada con una cópula  $C$  como sigue:

$$P(X \leq x, Y \leq y) = C[F(X), G(Y)] = p \quad (2.3)$$

donde  $C$  es la cópula, y  $F(X)$  y  $G(Y)$  son las funciones de distribución marginal acumulada de las variables aleatorias  $X$  y  $Y$ , respectivamente. La cópula  $C$  ofrece la flexibilidad de construir la distribución conjunta de variables aleatorias en términos de sus distribuciones marginales. La familia de cópulas para cada periodo analizado es la que mejor desempeño muestre en modelar la estructura de dependencia entre las dos variables.

El Índice Multivariado Estandarizado de Sequía (MSDI) está definido como:

$$\text{MSDI} = \varphi^{-1}(p) \quad (2.4)$$

donde  $\varphi$  es la función de distribución normal estándar. Una secuencia de MSDI negativos indica condiciones climáticas secas (*i. e.*, sequía), mientras que una secuencia de MSDI positivos representa una condición climática húmeda. MSDI cercano a cero se refiere a condiciones climáticas normales.

Si las dos variables analizadas son la precipitación y de la humedad del suelo, el MSDI es capaz de identificar el inicio de una sequía desde que se observa un déficit en la primer variable y reflejar su persistencia hasta la recuperación de la última. Otra propiedad de este índice es que, debido al análisis conjunto de las probabilidades marginales, al presentarse simultáneamente déficit en sus dos variables se diagnostica una condición más severa de sequía. Además, el índice puede ser traducido a una probabilidad de ocurrencia, por lo que puede ser usado para el análisis de riesgo.

**Fortalezas.** Puede ser empleado para monitorear condiciones secas y húmedas; es relativamente fácil de usar; es capaz de representar correctamente las condiciones de sequía en distintos regímenes climáticos.

**Limitaciones.** Requiere extensas series temporales de las variables analizadas.

La observación de la sequía y su seguimiento en el tiempo y espacio son fundamentales para mitigar los efectos adversos de este fenómeno. Como se ha visto en esta sección, existe un sinnúmero de índices (univariados y multivariados) que se pueden utilizar para el monitoreo de sequías. Dada la complejidad del fenómeno, estudios recientes en la materia indican que su monitoreo a partir de una sola variable puede resultar insuficiente para la detección de condiciones de sequía de una manera expedita y confiable (Hao y AghaKouchak, 2014). De esta manera, es necesario que el monitoreo de sequías evolucione hacia un marco de trabajo multi-variable y multi-índice, en el que la identificación de este fenómeno se realice utilizando las bondades de las variables más importantes en la generación del fenómeno, como ya se aprecia en algunos países (*e. g.*, Bachmair *et al.*, 2016; Behrangi *et al.*, 2016; S. Huang *et al.*, 2016; Ndehedehe *et al.*, 2016).

La siguiente sección presenta un resumen de las iniciativas de monitoreo de sequía más relevantes a nivel mundial y en México.

### 2.3. Monitoreo de sequías

En todo el mundo, el monitoreo de eventos extremos, como las sequías, es una actividad fundamental para los tomadores de decisiones. A partir de este, es posible identificar las regiones afectadas y se activan los protocolos de respuesta una vez iniciado un evento (Wilhite, 2000). Dicha información puede ser usada por planeadores, gestores de emergencias, tomadores de decisiones y legisladores, entre otros, para implementar programas y políticas que ayuden a reducir la vulnerabilidad asociada a la amenaza natural. Incluye la recolección y análisis de datos, el desarrollo de productos de datos (*e. g.* índices) y la comunicación de los productos de los datos a la sociedad. Los datos pueden ser físicos relacionados a la amenaza (*e. g.*, temperatura, precipitación, presión atmosférica, etc.) y datos sociales y biológicos que ayuden a definir la vulnerabilidad de una población dada.

Según la Sociedad Americana de Meteorología (2013), la mejor manera de abordar la predicción, desarrollo, intensificación y decadencia de una sequía es una estrategia de dos frentes:

**Preparación.** Monitoreo de las condiciones locales del agua y clima y los patrones de viento a gran escala, incluyendo la comparación de las condiciones actuales con sus análogas históricas.

**Predicción y alerta temprana.** Desarrollo e interpretación de pronósticos computacionales, que permiten determinar las condiciones futuras de las variables de interés dentro de la región de análisis.

Este aspecto forma parte de las prioridades establecidas en el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (2015-2030), de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR, 2015). En las que se se señala que “*los estados deben adoptar medidas específicas en todos los sectores, en los planos local, nacional, regional y mundial*” con respecto a los siguientes objetivos prioritarios:

1. comprender el riesgo de desastres;
2. fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionar dicho riesgo;
3. invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia; y
4. aumentar la preparación para casos de desastres a fin de dar una respuesta eficaz y para “reconstruir mejor” en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción.

### 2.3.1. Monitoreo de sequías en el mundo

#### Monitor de Sequía de los Estados Unidos de América

El *U. S. Drought Monitor* (Monitor de Sequía de E. U. A., USDM; <http://droughtmonitor.unl.edu/>) incluye información de índices climáticos estimados a partir de observaciones *in situ* y modelos numéricos. Además, cuenta con aportaciones de expertos locales y regionales en todo E. U. A. Está compuesto por dos productos: un mapa que muestra las áreas del país afectadas por sequía (ver la Figura 2.2) y un reporte que narra los detalles del fenómeno (Svoboda *et al.*, 2002). De forma semanal, se publican actualizaciones de ambos productos.

Este monitor evalúa la severidad de los periodos secos en función de seis indicadores físicos:

- Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI; Palmer, 1965);
- percentiles del modelo de humedad del suelo del Centro de Predicción Climática (CPC) del Servicio Nacional del Clima (NWS) de E. U. A. (J. Huang, van den Dool y Georgakakos, 1996);



Figura 2.2: Interfaz gráfica de usuario del Monitor de Sequía de E. U. A.

- percentiles diarios de flujo en cauces del Servicio Geológico de E. U. A. (USGS);
- porcentaje de la precipitación normal;
- Índice Estandarizado de Precipitación (SPI; McKee, Doesken y Kleist, 1993); e
- Índice Satelital de Salud de la Vegetación (VT; Kogan, 1995).

Además, se auxilia con el Índice de Humedad de Cultivo (CMI; Palmer, 1968); el Índice de Sequía Keetch-Bryam (KBDI; Keetch y Byram, 1968); el Índice de Peligro de Incendio del Servicio Forestal de E. U. A.; registros relacionados con la evaporación, tales como la humedad relativa y desviación de la temperatura normal, niveles de presas y lagos, niveles de acuíferos, observaciones *in situ* de humedad de suelo del Servicio Nacional de Estadística Agrícola de E. U. A. (NASS) y de la Red de Análisis de Suelo y Clima (SCAN) del Servicio de Conservación de Recursos Naturales de E. U. A. (NRCS), entre otros.

Cuadro 2.4: Categorías de magnitud de sequía en el Monitor de Sequía de E. U. A. (Svoboda *et al.*, 2002).

| Categoría | Condición de sequía | Impactos posibles  |
|-----------|---------------------|--|
| D0        | Anormalmente seco   | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Inicio de una sequía<br/>Retraso en el crecimiento de cultivos</li> <li>■ Final de una sequía<br/>Déficit de agua persistente<br/>Cultivos no completamente recuperados</li> </ul>        |
| D1        | Sequía moderada     | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Algunos daños en cultivos</li> <li>■ Reducción de flujo en cauces y niveles en cuerpos de agua y acuíferos</li> <li>■ Solicitud de restricciones voluntarias en el uso de agua</li> </ul> |
| D2        | Sequía severa       | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Probabilidad de pérdidas en cultivos</li> <li>■ Ocurrencia de escasez de agua</li> <li>■ Restricciones impuestas en el uso de agua</li> </ul>   |
| D3        | Sequía extrema      | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Pérdidas mayores en cultivos</li> <li>■ Escasez y restricciones de agua generalizadas</li> </ul>  |
| D4        | Sequía excepcional  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Pérdidas excepcionales y generalizadas en cultivos</li> <li>■ Escasez de agua en cuerpos de agua, cauces y acuíferos; emergencias hídricas</li> </ul>                                     |

La intensidad de la sequía es clasificada en tres niveles: D1, D2, D3 o D4 (de menor a mayor intensidad). Una quinta clasificación identifica áreas en condiciones anormalmente secas, que podrían señalar el próximo inicio de una sequía o los últimos indicios de un periodo seco antes de concluir. El Cuadro 2.4 muestra todas las categorías del USDM.

El mapa de severidad de sequía también identifica tres tipos de impactos de la sequía, a saber (Svoboda *et al.*, 2002): efectos en la agricultura, tales como impactos en cultivos y ganado (impactos tipo 'A'); impactos en alguna parte del sistema de abastecimiento de agua, incluyendo al flujo en corrientes de agua, manto de nieve, agua subterránea y presas (impactos tipo 'W'); y riesgo de incendio forestal en un área donde existen condiciones de sequía (impactos tipo 'F').

El reporte que acompaña al mapa, describe en qué consisten los cambios realizados en la

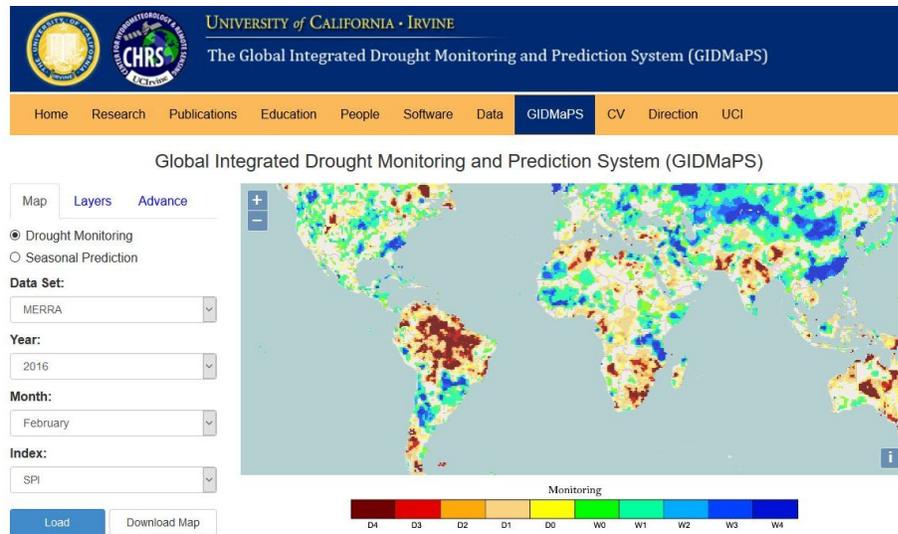


Figura 2.3: Interfaz gráfica de usuario del Sistema Global Integrado de Monitoreo y Predicción de Sequías.

última actualización. Además, agrega una breve discusión de los pronósticos, tendencias posibles y cambios que pueden esperarse en la próxima actualización (semanal). En algunos casos se agregan aspectos cualitativos de la sequía, difícilmente cuantificables en el mapa.

A partir de 2002 la metodología del USDM se extendió hasta Canadá y México, constituyendo el Monitor de Sequías de América del Norte (*North America Drought Monitor*, NADM; <http://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/nadm/>; Lawrimore *et al.*, 2002), en el que participan Agricultura y Agroalimentos Canadá, el Servicio Meteorológico de Canadá y el Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN). Sin embargo, existen diferencias importantes en la calidad y cantidad de información que se utiliza para generar este producto combinado. Por ejemplo, en E. U. A. se utilizan más de 3 500 estaciones terrestres para la determinación de la humedad del suelo en ese país, mientras que en México esta información es escasa y no contiene los años necesarios para determinar el comportamiento estadístico de la variable de una forma adecuada.

### Sistema Global Integral de Monitoreo y Predicción de Sequías

El *Global Integrated Drought Monitoring and Prediction System* (Sistema Global Integral de Monitoreo y Predicción de Sequías, GIDMaPS; <http://drought.eng.uci.edu/>) consiste en una iniciativa llevada a cabo por investigadores de la Universidad de California en Irvine (E. U. A.). La Figura 2.3 muestra su interfaz gráfica de usuario.

Este monitor ofrece información de sequía a través de un algoritmo que integra datos de precipitación y humedad de suelo de modelos numéricos y observaciones de sensores remotos, incluyendo los de las misiones *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications* (MERRA; Reichle *et al.*, 2011), *North American Land Data Assimilation System* (NLDAS; Mitchell *et al.*, 2004), *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS; Rodell, Houser *et al.*, 2004) y el *Global Drought Climate Data Record* (GDCDR; AghaKouchak y Nakhjiri, 2012).

GIDMaPS usa tres indicadores de sequía para su monitoreo y predicción: el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI; McKee, Doesken y Kleist, 1993); el Índice Estandarizado de Humedad del Suelo (SSI; Hao y AghaKouchak, 2013) y el Índice Estandarizado Multivariado de Sequía (MSDI; Hao y AghaKouchak, 2014). Los resultados se presenta en cinco categorías, a saber: anormalmente seco, sequía moderada, severa, extrema y excepcional.

El sistema cuenta con una componente de monitoreo que ofrece información de sequía basada en observaciones históricas, y una componente de predicción estacional, para la que usa el método de Predicción por Ensamble de Flujo en Cauces (ESP), propuesto por Lyon *et al.* (2012). Los resultados de esta componente, además de la severidad de sequía pronosticada, presentan la probabilidad de ocurrencia ( $P$ ), según las siguientes categorías (AghaKouchak, Hao y Nakhjiri, 2013):

- (a)  $P \geq 70\%$ : existe probabilidad de que la sequía persista
- (b)  $P \geq 90\%$ : es altamente probable que la sequía persista
- (c)  $P \geq 95\%$ : es extremadamente probable que la sequía persista

La resolución de los mapas producidos tanto en el monitor como en el pronóstico, depende del conjunto de datos seleccionado como fuente de información para el cálculo de los índices de sequía. El sistema permite seleccionar el año, mes, conjunto de datos base y el índice de sequía para desplegar un mapa con la información correspondiente.

La producción de los conjuntos de datos de MERRA ha sido descontinuada desde febrero de 2016, por lo que la última actualización de los mapas publicados en este monitor corresponde a ese periodo. A la fecha de redacción de este documento (julio de 2016), los resultados más recientes publicados en el sitio web del GIDMaPS son de mayo de 2016. Es decir, tienen dos meses de retraso.

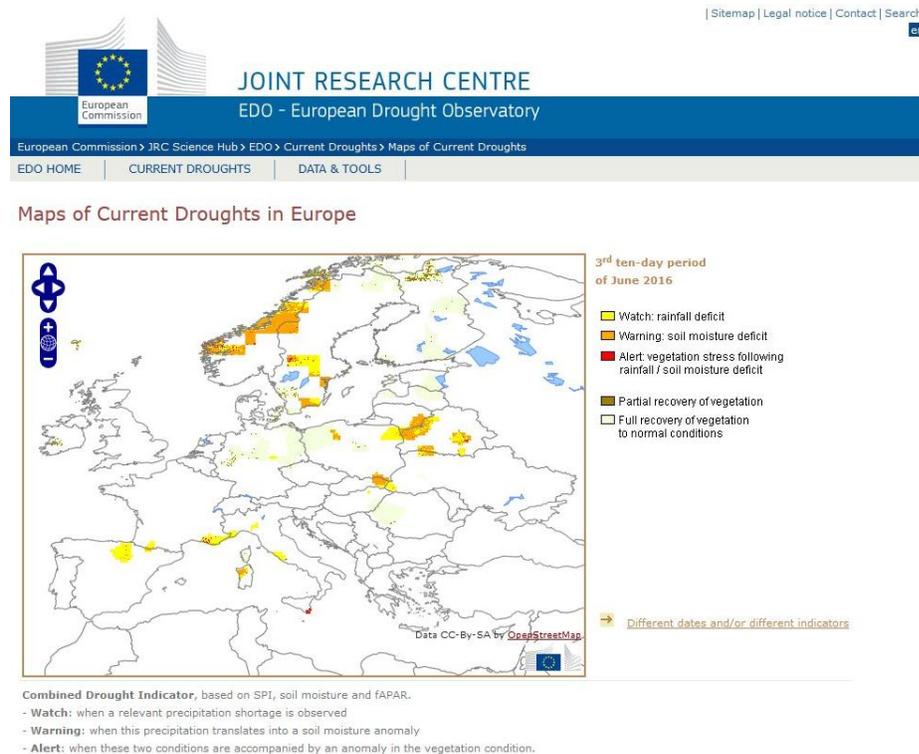


Figura 2.4: Interfaz gráfica de usuario del visor de mapas del Observatorio Europeo de Sequía.

### Observatorio Europeo de Sequía

El *European Drought Observatory* (Observatorio Europeo de Sequía, EDO; <http://edo.jrc.ec.europa.eu>) es un esfuerzo del Centro Conjunto de Investigación (JRC) de la Comisión Europea que tiene como objetivo integrar información de sequía de los Estados Miembros de la Unión Europea. De esta manera se genera una herramienta de monitoreo que incluye las escalas continental, nacional, regional y local. La Figura 2.4 muestra la apariencia del visor de mapas de este observatorio.

El EDO reporta las condiciones de sequía en función de los resultados de un índice multivariado llamado Indicador Combinado de Sequía (CDI), que integra el SPI<sub>03</sub> (McKee, Doesken y Kleist, 1993), la anomalía de humedad de suelo y la anomalía de Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (fAPAR; Gobron *et al.*, 2005).

El SPI<sub>03</sub> es usado para representar las condiciones locales de precipitación. La elección de tres meses como escala temporal para este índice obedece a que diversos estudios han mostrado que el SPI<sub>03</sub> tiene la correlación más fuerte con la respuesta de la vegetación ante

una reducción en la lluvia (*e. g.*, Ji y A. J. Peters, 2003), lo que lo hace más apto para caracterizar la sequía agrícola.

La humedad de suelo es obtenida mediante el modelo LISFLOOD (de Roo, Wesseling y van Deursen, 2000), usando observaciones meteorológicas puntuales de la unidad de Monitoreo de Recursos Agrícolas (MARS) del JRC. El CDI usa a la succión del suelo (pF) como una aproximación de la humedad de suelo, dado que está directamente relacionada con el estrés hídrico de las plantas. La pF representa el logaritmo de la altura de la columna de agua (en centímetros) necesaria para dar la fuerza que la planta requiere para extraer agua del suelo.

Finalmente, se utiliza una variable biofísica directamente relacionada con la productividad de la vegetación conocida como fAPAR. Esta variable representa la fracción de la energía solar absorbida por la vegetación, dado que la radiación fotosintéticamente activa interceptada es la energía (transportada por fotones) que requiere el proceso de productividad bioquímica de las plantas. El EDO usa los datos de fAPAR que publica la Agencia Espacial Europea (ESA) obtenidos por el satélite ENVISAT.

El marco conceptual detrás del CDI se fundamenta en una relación causa-efecto idealizada que deriva en una sequía agrícola. Esta relación supone que una escasez de precipitación (la causa) provoca un déficit de humedad de suelo que resulta en una reducción de la producción vegetal (el efecto) (Sepulcre-Canto *et al.*, 2012). Lo anterior ofrece la oportunidad de establecer un sistema de alerta temprana para la sequía agrícola al identificar en qué etapa de la relación causa-efecto se encuentra actualmente una región dada y permite a las autoridades prepararse mejor ante un evento de sequía.

El esquema de clasificación del monitor está compuesto de tres niveles de alerta, a saber (Sepulcre-Canto *et al.*, 2012):

- i *Observación*. La precipitación es menor que la normal. Existe un incremento en la probabilidad de que se presente una sequía que afecte a la agricultura. La situación debe ser monitoreada atentamente y las medidas de respuesta deben estar listas para ser activadas.
- ii *Precaución*. La humedad de suelo se encuentra en déficit. Se espera que ocurra una sequía que afecte a la agricultura. Las acciones de respuesta deben ser activadas para minimizar la exposición ante la amenaza.
- iii *Alerta*. La vegetación da signos de estrés. La sequía agrícola ha iniciado. Las estrategias de respuesta deben continuar o ser fortalecidas además de que las condiciones deben ser monitoreadas atentamente.

Cuadro 2.5: Categorías del Indicador Combinado de Sequía (Sepulcre-Canto *et al.*, 2012) para el Observatorio Europeo de Sequía.

| Categoría   | Definición  |
|-------------|---|
| Observación | $SPI_{03} < -1$   |
| Precaución  | Anomalía de pF $> 1 + SPI_{03} < -1$                            |
| Alerta 1    | Anomalía de fAPAR $< -1 + SPI_{03} < -1$                        |
| Alerta 2    | Anomalía de fAPAR $< -1 +$ Anomalía de pF $> 1 + SPI_{03} < -1$ |

El criterio para establecer cada etapa del esquema de clasificación, en función de los valores de los índices analizados, se resume en el Cuadro 2.5. En éste se han definido dos subcategorías de la etapa de *Alerta*. Lo anterior permite considerar los casos en que las condiciones de sequía meteorológica resultan en una rápida reducción en la productividad de la vegetación, incluso sin ser precedida por anomalías en la humedad del suelo (Alerta 1). Esto puede asociarse a déficits extremos de lluvia durante las etapas más críticas del crecimiento de las plantas. La emisión de la Alerta 2 requiere una evidencia más fuerte de sequía, considerando umbrales en los tres indicadores, como se muestra en el cuadro.

### Monitor Africano de Inundación y Sequía

El *African Flood and Drought Monitor* (Monitor Africano de Inundación y Sequía; <http://stream.princeton.edu/AWCM/WEBPAGE/>) consiste en un monitor de sequía que usa información de sensores remotos vía satélite y observaciones *in situ*; una plataforma de modelación hidrológica; y una interface gráfica de usuario en línea (ver la Figura 2.5). Este proyecto fue desarrollado por el programa de Información de Agua y Desarrollo para Territorios Áridos: Red Global (G-WADI) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y tiene su base en la Universidad de Princeton.

Esta herramienta estima las condiciones de sequía a través de una combinación de modelación hidrológica, percepción remota por satélite, y pronósticos climatológicos estacionales. El sistema consta de tres partes (Sheffield, E. F. Wood *et al.*, 2014):

- reconstrucción histórica del ciclo hidrológico terrestre;
- sistema de monitoreo en tiempo real; y
- pronóstico estacional

La *reconstrucción del ciclo hidrológico* se realiza mediante una simulación hidrológica re-

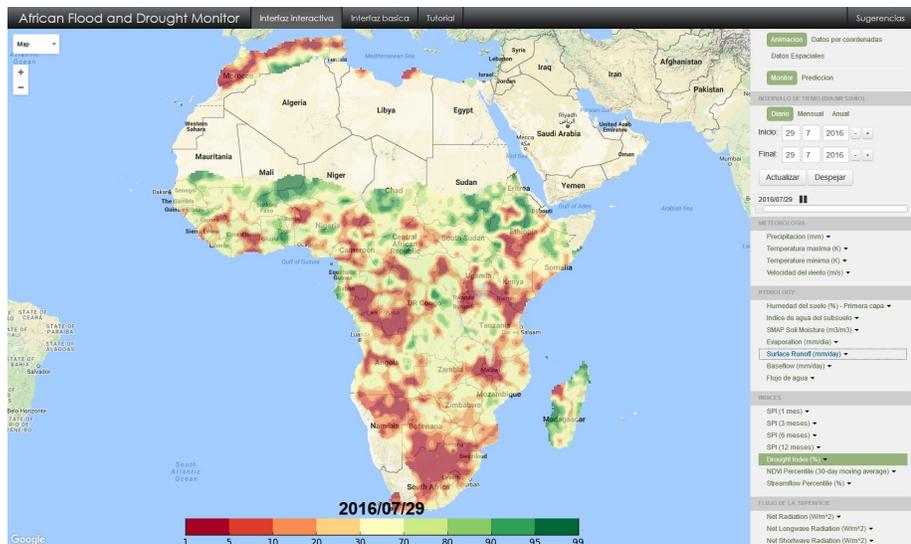


Figura 2.5: Interfaz gráfica de usuario del Monitor Africano de Inundación y Sequía.

prospectiva usando el modelo hidrológico superficial semidistribuido de Capacidad de Infiltración Variable (VIC; Liang, E. F. Wood y Lettenmaier, 1996). Esta simulación forma la climatología a largo plazo con la que serán comparadas las condiciones actuales. Comprende el periodo 1950-2008 y es forzada por el conjunto de datos meteorológicos globales de Sheffield, Goteti y E. F. Wood (2006), que combina datos observacionales mallados con productos de percepción remota y datos atmosféricos de reanálisis.

El *monitoreo en tiempo real* también emplea el modelo VIC. En este caso, el modelo es forzado por una combinación de datos de precipitación del Análisis de Precipitación Multi-satélite de la *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) (TMPA; Huffman *et al.*, 2007) y temperatura y velocidad del viento del Sistema de Pronóstico Global (GFS) del Centro Nacional para la Predicción Ambiental (NCEP) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de E. U. A. (NOAA). Otras variables requeridas (radiación solar, humedad, presión) son calculadas a partir de los datos de precipitación y temperatura usando regresión empírica (Bohn *et al.*, 2013).

El *pronóstico estacional* se basa en el Sistema de Pronósticos Climáticos del NCEP (CFSv2; Saha *et al.*, 2014) para obtener pronósticos de precipitación y temperatura cuyas escalas espacial y temporal son reducidas hasta obtener valores diarios con resolución de  $0.25^\circ$ . Estos datos son usados como forzamiento para el modelo VIC para generar los pronósticos hidrológicos.

Para cada parte del sistema (*i. e.*, reconstrucción histórica, monitoreo y pronóstico), se estima una serie de índices de sequía. Las condiciones asociadas a la *sequía meteorológica*

son representadas mediante el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI; McKee, Doesken y Kleist, 1993) para escalas temporales de 1, 3, 6 y 12 meses.

El déficit de humedad de suelo (principal característica de la *sequía agrícola*) es cuantificado por medio de dos índices de humedad de suelo: uno generado a partir de los resultados del modelo VIC, y otro a partir de los datos de la misión satelital *Soil Moisture Ocean Salinity* (SMOS) de la ESA.

El *estrés hídrico en la vegetación* es monitoreado con tres productos obtenidos mediante sensores de visibilidad y microondas: un índice de vegetación (VI) basado en percepción óptica<sup>2</sup>, un producto de microondas pasivas<sup>3</sup> de Profundidad Óptica de Vegetación (VOD), y un producto de microondas activas<sup>4</sup> basado en la reflexión captada por el dispersómetro (dB). El VI captura la clorofila de las hojas y la intensidad fotosintética de la cobertura forestal (Sellers *et al.*, 1992). El VOD captura la columna total de agua a través de toda la cobertura forestal (Jones *et al.*, 2012). Por último, el dB captura la biomasa de la cobertura forestal y el contenido de agua de su capa superficial.

La *sequía hidrológica* es observada mediante los percentiles de flujo en cauces, y el déficit acumulado de flujo en cauces usando los resultados del modelo VIC.

### Monitor Latinoamericano de Inundación y Sequía

El *Latin American Flood and Drought Monitor* (Monitor Latinoamericano de Inundación y Sequía; <http://stream.princeton.edu/LAFDM/WEBPAGE/>) es una herramienta para evaluar condiciones de sequía e inundación actuales y esperadas para la región. Fue desarrollado en una colaboración del programa de Información de Agua y Desarrollo para Territorios Áridos: Red Global (G-WADI) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), el Grupo de Hidrología Terrestre de la Universidad de Princeton y el Centro Internacional para la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (ICI-WaRM). Su base metodológica es la misma que emplea el Monitor Africano de Inundación y Sequía, por lo que se refiere al lector a dicha subsección para conocer sus detalles.

El portal contiene información sobre las condiciones meteorológicas actuales (precipitación, temperatura, radiación y velocidad del viento), así como los indicadores de sequía (SPI,

<sup>2</sup>La *percepción óptica* (o visible) mide la cantidad de radiación solar reflejada por los objetos en la superficie terrestre.

<sup>3</sup>Se llama *microonda pasiva* a la técnica de percepción remota que capta la radiación emitida naturalmente por la Tierra.

<sup>4</sup>La *microonda activa* es la técnica de percepción remota basada en captar la reflexión que presentan las microondas emitidas activamente por un radar hacia la superficie terrestre.

humedad de suelo, NDVI) y los indicadores de inundación (caudales). La interfaz gráfica de usuario del Observatorio permite obtener de forma espacial o para puntos específicos, los datos para un periodo de tiempo seleccionado y compararlos con las condiciones normales. El Observatorio también cuenta con pronóstico a corto plazo (7 días) y largo plazo (meses).

### Observatorio de Sequía de Chile

El Observatorio de Sequía de Chile (<http://www.climatedatalibrary.cl/UNEA/maproom/Monitoring/>) está compuesto por una serie de mapas para el monitoreo de la sequía a través de indicadores relevantes, seleccionados para mostrar los efectos del déficit de humedad en las distintas etapas de la propagación de la sequía, así como su efecto combinado. La información de variables medidas (*e. g.*, precipitación, nivel de embalses) puede ser consultada como valores absolutos, porcentaje con respecto a la normal y anomalía estandarizada.

Los indicadores asociados a la sequía meteorológica publicados en el Observatorio consiste en: (i) precipitación observada en las estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas (DGA) y la Red Agroclimática Nacional (RAN); (ii) Índice Estandarizado de Precipitación (SPI; McKee, Doesken y Kleist, 1993) para múltiples escalas temporales con base en observaciones *in situ* y con datos de percepción remota; y (iii) temperatura observada en las estaciones de la RAN.

Por otro lado, los indicadores asociados a la sequía hidrológica son: (i) caudales observados en las cuencas principales de Chile ; (ii) niveles de embalses; y (iii) niveles de nieve en la cordillera de Chile.

La sequía agrícola es monitoreada a partir de (i) mapas del NDVI y (ii) balance hídrico del suelo (solo para Chile Central), calculado por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) Quilamapu. Este indicador refleja el contenido de humedad en el suelo con respecto a su capacidad de campo. Los valores por debajo del 50% indican una reducción en la disponibilidad de agua, lo que puede causar estrés en la vegetación.

El Observatorio de Sequía de Chile ofrece un mapa de Indicador Combinado de Sequía (CDI; Sepulcre-Canto *et al.*, 2012) que refleja el estado actual de la sequía en el país, considerando los efectos combinados de la sequía meteorológica, hidrológica y agrícola. El criterio para establecer cada etapa del esquema de clasificación, en función de los valores de los índices analizados, se resume en el Cuadro 2.6.

Cuadro 2.6: Categorías del Indicador Combinado de Sequía para el Observatorio de Sequía de Chile.

| Categoría   | Definición  |
|-------------|---|
| Observación | $SPI_{06} < -0.84$  |
| Precaución  | $Anomalía\ del\ caudal < -0.84 + SPI_{06} < -0.84$                              |
| Alerta      | $Anomalía\ del\ NDVI < -0.3 + Anomalía\ del\ caudal < -0.84 + SPI_{06} < -0.84$ |

### 2.3.2. Monitoreo de sequías en México

El Programa Nacional contra la Sequía (PRONACOSE), administrado por la CONAGUA, representa el principal elemento de la política pública de atención a las sequías en México. Fue puesto en marcha en enero de 2014 y tiene como objetivo la elaboración de instrumentos que permitan la gestión integrada de los Consejos de Cuenca en relación al manejo del recurso hídrico bajo los efectos de este fenómeno natural con un enfoque preventivo (CONAGUA, 2014).

Dentro de este programa, el elemento operacional de mayor énfasis es el desarrollo de un sistema de alerta temprana para la ocurrencia de sequías a través del monitoreo y difusión de la información.

Actualmente, a más de dos años de la puesta en marcha del PRONACOSE, la CONAGUA cuenta con varios instrumentos para el monitoreo de la sequía disponibles públicamente en el sitio web del Programa (<http://www.pronacose.gob.mx/>):

- mapas y reportes de vulnerabilidad ante sequía;
- el Monitor de Sequía en México;
- mapas de sequía hidrológica; y
- mapas de sequía meteorológica.

El Monitor de Sequía en México (MSM; <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>), publicado quincenalmente por el SMN de la CONAGUA forma parte del NADM. A partir de 2014, el MSM emite quincenalmente mapas de sequía, siempre basado en la metodología utilizada por el USDM y el NADM.

De igual forma que el NADM, este Monitor se basa en la obtención e interpretación de diversos índices o indicadores de sequía tales como el SPI (McKee, Doesken y Kleist, 1993); porcentaje de la normal; Índice Satelital de Salud de la Vegetación (VHI), que mide el grado

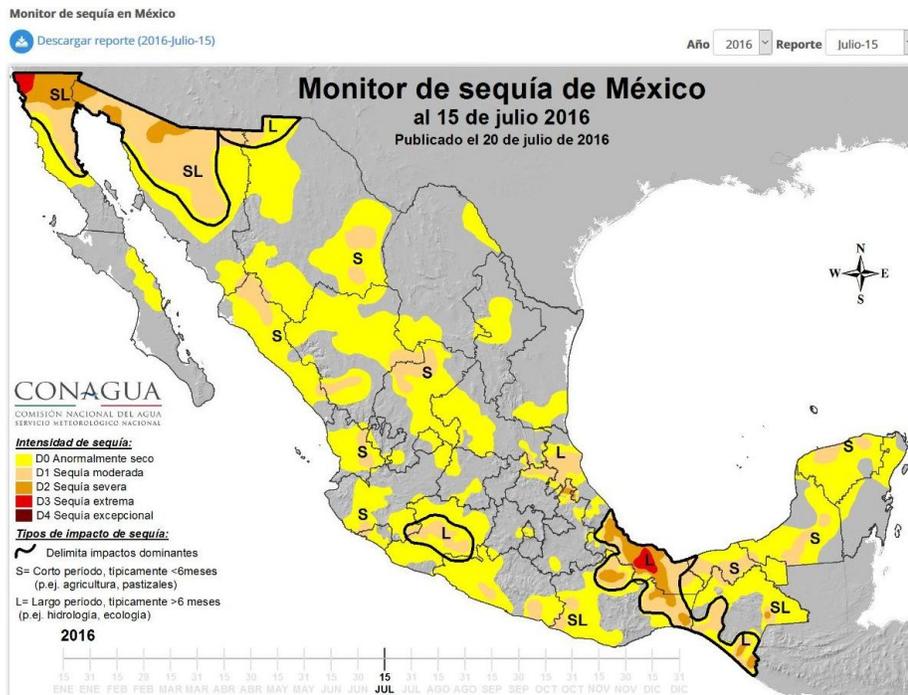


Figura 2.6: Interfaz gráfica de usuario del Monitor de Sequía en México.

de estrés de la vegetación a través de la radiancia observada; el Modelo de Humedad del Suelo *Leaky Bucket* (J. Huang, van den Dool y Georgakakos, 1996), que estima la humedad del suelo mediante un modelo hidrológico de balance hídrico de una capa; el NDVI; la anomalía de la temperatura media; el porcentaje de disponibilidad de agua en las presas del país; y la aportación de expertos locales. Mediante un consenso, se determinan las regiones afectadas por sequía, de acuerdo a la escala de intensidades que es común en los tres países participantes del NADM (*i. e.*, Canadá, E. U. A. y México) que considera las categorías anormalmente seco (D0), sequía moderada (D1), sequía severa (D2), sequía extrema (D3) y sequía excepcional (D4). Como resultado del consenso se trazan polígonos para cada intensidad de sequía. Cuando los polígonos corresponden al análisis de mediados de mes (emitido los días 15 de cada mes) se utilizan para cuantificar la sequía sobre el territorio nacional cuando corresponden a la evaluación final de cualquier mes, complementa además al mapa regional o continental del NADM.

El MSM consta de un reporte que contiene una descripción de la sequía en el país, tablas y gráficos de porcentaje de área afectada por sequía a nivel nacional, estatal y regional, además de la contabilidad de municipios afectados por cualquier categoría de sequía.

La Figura 2.6 muestra un ejemplo de los mapas de sequía generados por el MSM.

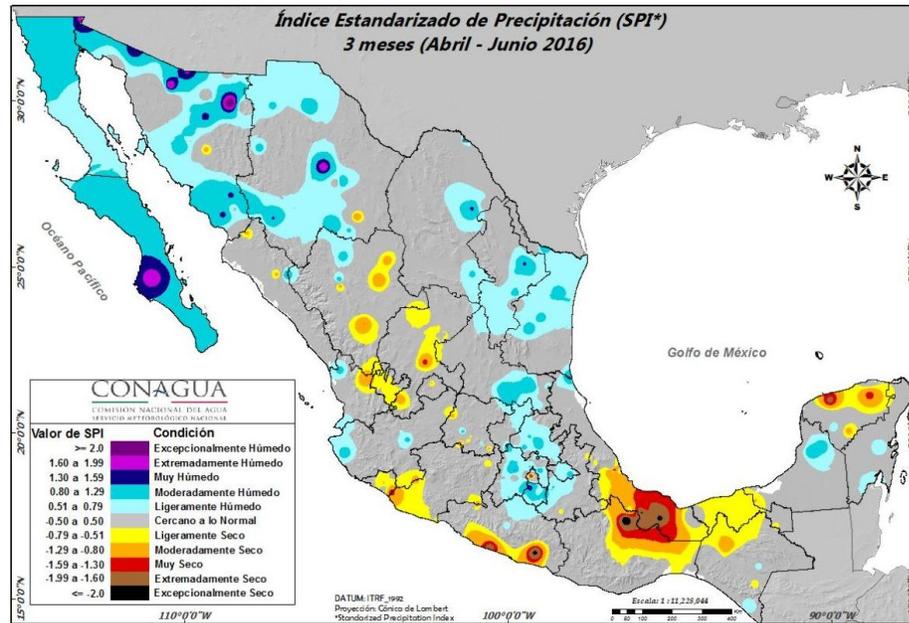


Figura 2.7: Interfaz gráfica de usuario del mapa de Índice Estandarizado de Precipitación del Monitor de Sequía en México.

El SMN publica semanalmente mapas del SPI (McKee, Doesken y Kleist, 1993) para 1, 3, 6, 9, 12 y 24 meses de escala temporal para monitorear la sequía meteorológica. Este índice es calculado a partir de un conjunto de estaciones de la Base de Datos Climatológica, que puede variar debido a la pérdida o incorporación de estaciones de largo período. La Figura 2.7 muestra la información referente al SPI que es posible consultar y descargar del MSM.

Así mismo, cada semana se presentan las condiciones de sequía en función del escurrimiento registrado en 375 estaciones hidrométricas que operan en todo el país.

Actualmente, es necesario reconocer que el Monitor de Sequía de México, está muy limitado respecto a los ejemplos que se han presentado en esta sección. Es evidente que la evaluación de la sequía es de gran importancia para la planeación y gestión de los recursos hídricos nacionales. Si bien es cierto que el MSM respondió a las necesidades de inicios de este siglo, acerca de la generación de herramientas de monitoreo y evaluación de la sequía (Svoboda *et al.*, 2002), los avances en el conocimiento y la tecnología indican que es necesario incorporar más fuentes de información para un adecuado monitoreo de la sequía en el país.

De momento, el MSM tiene su base en un número limitado de pluviómetros y estaciones hidrométricas, que a su vez reducen su confiabilidad y precisión. Esto se debe a que existen muchas áreas del país que no se encuentran bien instrumentadas, o en las que la cantidad

de datos son insuficientes para definir los indicadores necesarios para identificar la sequía de una forma adecuada. Mientras que en otras regiones, la densidad espacial de las observaciones disponibles es insuficiente para identificar los patrones espacio-temporales de manera confiable.

Como se ha visto a lo largo de esta sección, el creciente desarrollo de las misiones de satélite de las agencias espaciales de Estados Unidos de América y de la Comunidad Europea ha abierto una puerta para la utilización de observaciones de percepción remota para la observación de variables hidrológicas. Lo que, a su vez, ha redundado en su utilización para la observación de variables relacionadas con el monitoreo de la sequía en todo el mundo.

La tendencia global de utilizar esta información —de acceso libre al público— con fines de monitoreo y predicción de sequía no ha tenido en México una respuesta acorde. Este trabajo de tesis representa un esfuerzo en esta dirección. De tal manera que se produce una nueva herramienta de monitoreo nacional, por medio de la integración de datos obtenidos con indicadores tradicionales (*e. g.*, SPI) y nuevos indicadores multivariados (*i. e.*, MSDI).

## Capítulo 3

# Metodología

Como se registró en los capítulos anteriores, el avance conjunto del conocimiento y los sistemas de asimilación de datos han permitido la creación de sistemas de monitoreo de sequía robustos, que permiten evaluar los índices de sequía más comunes a diferentes escalas espaciales (*e. g.*, regional, nacional, global). Esta posibilidad, junto con la disposición de datos obtenidos *in situ* por estaciones climáticas e hidrométricas, permite tener una representación espacio-temporal confiable de un evento en las diferentes etapas del ciclo hidrológico.

La metodología desarrollada para el presente trabajo de investigación integra información proveniente de los sistemas de análisis retrospectivo y de asimilación de datos globales, ambos de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos de América (NASA, por sus siglas en inglés) para la estimación nacional de índices multivariados de variables hidrológicas relacionadas con la sequía. De esta manera, se hace uso de los últimos avances en el estado del arte mundial para la generación de un marco de trabajo moderno que permita una mejor cuantificación de la sequía en México.

Las fuentes de información de las variables hidrometeorológicas corresponden a aquellas generadas con los sistemas de asimilación de datos *Global Land Data Assimilation System* (Sistema Global de Asimilación de Datos Terrestres, GLDAS) y *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications* (Análisis Retrospectivo de la Era Moderna para Investigación y Aplicaciones, MERRA). La representación espacial de las variables por medio de una retícula a lo largo del territorio nacional permite la generación de mapas donde se muestra la distribución espacial de la intensidad, magnitud y persistencia de sequía en México. Para esto, se estiman los indicadores univariados y multivariados a diferentes escalas temporales.

Con el propósito de evaluar la viabilidad y confiabilidad de estas fuentes de información, se contrastan los resultados obtenidos de estos sistemas, con aquellos valores obtenidos de observaciones directas de precipitación y escurrimiento a través de estaciones pluviométricas e hidrométricas en todo el país.

De esta manera, este capítulo ofrece una descripción detallada de las fuentes de información consultadas, el proceso de cálculo de los índices de sequía (univariados y multivariados), así como su verificación con información de campo.

### 3.1. Fuentes de información

Como se ha dicho, para el proceso de verificación de los resultados derivados de este trabajo de investigación, se compararon resultados provenientes de observaciones directas con aquellas derivadas de sistemas de asimilación de datos. En esta sección se describen a detalle cada una de estas fuentes de información.

#### 3.1.1. Productos de observación directa

##### Base de Datos Climatológica Nacional

La Base de Datos Climatológica Nacional (BDCN) contiene registros históricos de más de 6 000 estaciones climatológicas distribuidas en todo el territorio mexicano, de las que actualmente se encuentran en operación aproximadamente 3 500. Está disponible para consulta y descarga a través de la plataforma en línea denominada *Sistema CLICOM* (<http://clicom-mex.cicese.mx/>), producto del Proyecto Climático de Computación (*Climate Computing Project*, CLICOM), conducido en la década de 1990 por la Organización Meteorológica Mundial para asistir a todos los países miembros en la mejora de servicios de procesamiento de datos climatológicos.

Las estaciones de medición que alimentan a la base de datos registran diariamente a las 8:00 a. m. (hora local) la temperatura máxima y mínima de las últimas 24 horas y los valores acumulados de precipitación y evaporación. Adicionalmente, se toman observaciones como las del estado de nubosidad del cielo y la ocurrencia de granizo, helada, tormenta o neblina (Miranda Alonso, Benítez Pensado y Flores Zamudio, 2006).

### Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales

Por otro lado, el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) es una base de datos que integra los registros de la red hidrométrica nacional de México. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de México, a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), da soporte y actualiza el BANDAS, que cuenta con el historial de registros de más de 2 200 estaciones hidrométricas en cauces naturales y canales de irrigación y casi 200 almacenamientos.

Los registros de aforo en corrientes concentran información a distintas escalas temporales referente a gastos medios diarios, datos hidrométricos mensuales y anuales, gastos instantáneos, flujo de sedimentos, y nivel del agua. Por otro lado, los registros en almacenamientos incluyen información del funcionamiento diario de vaso, valores extremos mensuales de gasto, volumen y lectura de escala, datos horarios, y datos especiales en algunos vasos de almacenamiento. Su descarga es gratuita y libre desde el sitio web del protocolo de transferencia de archivos de la CONAGUA, en la dirección <ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas>. La actualización de la información se lleva a cabo, aproximadamente, cada tres años (Solís-Alvarado *et al.*, 2015) y al momento de la redacción de este documento (septiembre de 2016), los datos más recientes corresponden a diciembre de 2014.

#### 3.1.2. Productos de asimilación de datos y reanálisis

La asimilación de datos es una técnica de análisis en la que la información observada es agregada con propósitos de simulación numérica, de tal manera que las condiciones reales del sistema son incorporadas a los modelos matemáticos proveyendo consistencia respecto a la evolución temporal y propiedades físicas de las variables observadas (Bouttier y Courtier, 2002; Houser, de Lannoy y J. P. Walker, 2012). Este proceso resulta en una clara mejoría en el desempeño de los modelos numéricos para representar la realidad.

Existen dos formas generales de llevar a cabo la asimilación de datos: *asimilación secuencial*, que considera solo observaciones realizadas en el pasado hasta el momento del análisis; y *asimilación no secuencial* —también llamada *asimilación retrospectiva*—, en la que son incorporadas nuevas observaciones conforme van siendo obtenidas (Bouttier y Courtier, 2002). Precisamente, a este último enfoque de asimilación de datos pertenece la técnica llamada *reanálisis*.

Para llevar a cabo esta investigación, fueron recopilados más de 3 400 archivos electrónicos (aproximadamente 53 Gb de información) de campos de variables hidrológicas y atmosféricas.

cas de dos productos de asimilación, provenientes del *Global Land Data Assimilation System* versión 1 y 2 (Sistema Global de Asimilación de Datos Terrestres, GLDAS-1 y GLDAS-2) y el *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications* versión 2 (Análisis Retrospectivo de la Era Moderna para Investigación y Aplicaciones, MERRA-2). Esta subsección describe ambos productos.

### Global Land Data Assimilation System

GLDAS (Rodell, Houser *et al.*, 2004) es generado mediante un marco de infraestructura digital llamado *Land Information System* (Sistema de Información Terrestre, LIS; Kumar *et al.*, 2006), desarrollado por el Laboratorio de Ciencias Hidrológicas del Centro de Vuelo Espacial Goddard (GSFC) de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de E. U. A. (NASA). Consiste en diversos modelos de superficie terrestre (desacoplados de cualquier modelo atmosférico) forzados con observaciones, lo que evita sesgos de forzamientos resultados de predicciones climáticas numéricas. Su objetivo principal es integrar productos de percepción remota y observación terrestre con técnicas de modelación para generar campos de estado y flujo de superficie terrestre.

Este producto usa un conjunto de datos globales de clasificación de la cobertura del suelo con resolución de 1 km, producido por la Universidad de Maryland (E. U. A.) que incluye once tipos de vegetación, además de agua, terreno sin cultivar, y cobertura urbana. Así mismo, incorpora series de tiempo de percepción remota del índice de área foliar (LAI) con resolución de 1 km. Los mapas de parámetros del suelo usados en GLDAS fueron derivados del conjunto de datos globales de 5' de resolución de Reynolds, Jackson y Rawls (2000). La información de elevación y pendiente es obtenida de un mapa topográfico global de 30" de resolución (GTOPO, Verdin y Greenlee, 1996), promediada en la malla de 0.25° y 1° propias de GLDAS. Los flujos globales de radiación solar son estimados a partir de productos de nubosidad y cobertura de nieve del *Agricultural Meteorology modeling system* (sistema de modelación de Meteorología Agrícola, AGRMET) de la Agencia del Clima de la Fuerza Aérea de E. U. A. (AFWA). Además, se obtienen datos de precipitación a partir de herramientas de percepción remota derivados de distintas misiones espaciales.

Este sistema ofrece resultados de cuatro distintos modelos de superficie terrestre (LSM) mediante los que simula la transferencia de masa, energía y *momentum* entre las superficies del suelo y vegetación y la atmósfera, a saber: modelo Mosaico, modelo NOAH, Modelo Terrestre Comunitario (CLM) y modelo de Capacidad de Infiltración Variable (VIC).

El modelo de columna unidimensional de *Mosaico* (Koster y Suarez, 1996) debe su nombre

a la estrategia de “mosaico” que usa para considerar la heterogeneidad de las características de la superficie a una escala inferior a la de la malla de variables atmosféricas. Cada celda es subdividida en subregiones relativamente homogéneas, o “teselas”, en las que cada una contiene un solo tipo de vegetación o suelo (Koster y Suarez, 1992). Dentro de cada tesela se llevan a cabo los cálculos del balance de energía y agua en cada paso de tiempo y cada tesela mantiene su propio contenido de humedad y temperatura. Las teselas de una celda responden a las condiciones medias de su celda correspondiente en la malla de variables atmosféricas; dicha celda, a su vez, responde a los flujos de calor y humedad provenientes de las teselas. Las teselas dentro de una celda, no interactúan directamente entre sí, pero pueden afectar al resto a través de la atmósfera sobreyacente (Koster y Suarez, 1996).

El *Modelo Terrestre Comunitario* (CLM; Dai, X. Zeng *et al.*, 2003) sigue el mismo concepto de Avissar (1992) y Koster y Suarez (1992) al emplear subdivisiones de la malla de variables atmosféricas, y guardar el balance de masa y energía dentro del contexto de cada tesela. CLM incluye componentes de tres modelos distintos: el Modelo de Superficie Terrestre del Centro Nacional de Investigación Atmosférica de E. U. A. (NCAR) (Bonan, 1998), el Esquema de Transferencia Biósfera-Atmósfera (BATS; Dickinson *et al.*, 1986), y el LSM del Instituto de Física Atmosférica de la Academia China de Ciencias (Dai y Q. Zeng, 1997). Aplica métodos de discretización espacial de diferencias finitas y un esquema implícito de integración del tiempo para integrar numéricamente las ecuaciones rectoras.

El modelo *National Centers for Environmental Prediction/Oregon State University/Air Force/Hydrologic Research Lab*, conocido como *NOAH* (Chen *et al.*, 1996) ha sido desarrollado desde 1993 a través de la colaboración de instituciones públicas y privadas. Es un modelo de columna unidimensional que aplica métodos de diferencias finitas para la discretización espacial y un esquema de integración temporal de Crank-Nicholson para integrar numéricamente las ecuaciones rectoras de los procesos físicos del medio suelo-vegetación-nieve.

El modelo de *Capacidad de Infiltración Variable* (VIC; Liang, Lettenmaier *et al.*, 1994) es un modelo hidrológico a macroescala que resuelve los balances de agua y energía, desarrollado a principios de la década de 1990 y actualmente es mantenido y mejorado en la Universidad de Washington (E. U. A.). Se enfoca en los procesos de escurrimiento representados por (i) una curva de infiltración variable, (ii) una parametrización de la variabilidad de la capacidad de retención de humedad del suelo a escala submalla, y (iii) el flujo base no lineal.

La asimilación de datos combina mediciones y predicciones de los modelos con el objetivo de maximizar la cobertura, consistencia, resolución y precisión espacial y temporal (Rodell, Houser *et al.*, 2004) de la información de variables atmosféricas e hidrológicas. Con

este objetivo, GLDAS incluye algoritmos de asimilación de datos de percepción remota de temperatura, humedad del suelo y cobertura de nieve.

El producto GLDAS-1 cuenta con resultados de los cuatro LSM desde enero de 1979 hasta el presente con una resolución global de  $1^\circ$  y desde abril de 2000 hasta el presente con una resolución de  $0.25^\circ$  para el modelo NOAH. En ambos casos, los productos se actualizan mensualmente. No obstante, existen algunos problemas en sus conjuntos de datos. Algunos de ellos son (<http://ldas.gsfc.nasa.gov>):

1. los campos de forzamiento en todos los modelos presentan un alto grado de incertidumbre durante el periodo 1995-1997;
2. el campo de intensidad de lluvia en algunos conjuntos de datos de  $0.25^\circ$  a partir de 2001 presenta granularidad en los máximos y mínimos de celdas adyacentes, generado por el método de disgregación usado para la aplicación de los campos de precipitación del *CPC Merged Analysis of Precipitation* (Análisis Combinado de Precipitación del Proyecto de Climatología de la Precipitación Global, CMAP); y
3. los problemas con los campos de forzamiento afectan los resultados de humedad del suelo, escurrimiento, flujos, etc.

En 2012 fue publicada una segunda versión de GLDAS (GLDAS-2), misma que cuenta con dos componentes: uno forzado enteramente con los datos meteorológicos de forzamiento de Princeton (conocido como GLDAS-2.0), y otro forzado con un conjunto de datos de forzamiento basados en una combinación de modelo y observación (conocido como GLDAS-2.1). Actualmente, GLDAS-2.0 contiene resultados para el periodo 1948-2010, mientras que GLDAS-2.1 abarca un periodo desde 2000 hasta el presente y es actualizado mensualmente. Hasta la fecha, el único LSM para GLDAS-2 es el modelo NOAH, sin embargo, la documentación del producto indica que en el futuro se incorporará el resto de los modelos incluidos en GLDAS-1.

GLDAS-2 resuelve la presencia de tendencias artificiales introducidas en GLDAS-1 debido al cambio de fuentes de información a través de su periodo modelado. Otras mejoras obtenidas con GLDAS-2 incluyen la actualización del modelo, cambiando a conjuntos de datos de parámetros de superficie terrestre basados en el *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (Espectrómetro de Imágenes de Resolución Moderada, MODIS).

Los conjuntos de datos de GLDAS-1 y GLDAS-2 pueden ser descargados en escala temporal tri-horaria y mensual en el sitio web del Centro de Datos de Ciencias de la Tierra y Servicios de Información de Goddard (GES DISC; <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov>).

### Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications

MERRA (Rienecker *et al.*, 2011) usa la versión 5 del modelo *Goddard Earth Observing System* (Sistema Goddard de Observación de la Tierra, GEOS-5) y su sistema de asimilación de datos (DAS) para generar un reanálisis atmosférico. El reanálisis combina campos generados por modelaciones con observaciones de distribuciones espacial y temporal irregulares para formar un conjunto de datos meteorológicos mallados.

El modelo de circulación general atmosférica (AGCM) GEOS-5 está basado en la dinámica de volúmenes finitos. Incluye diversos esquemas para representar la física de la humedad para la formación de nubes, la radiación de energía de onda corta y onda larga, la turbulencia en la capa límite atmosférica y las ondas de gravedad orográficas y no orográficas. La superficie terrestre es representada por medio del Modelo de Cuenca de Superficie Terrestre (Koster, Suarez *et al.*, 2000). La malla empleada para MERRA es de  $1/2^\circ$  de latitud por  $2/3^\circ$  de longitud con 72 niveles verticales, desde la superficie hasta 0.01 hPa.

MERRA incorpora observaciones convencionales que consisten en variables atmosféricas estándar, como son, la presión, temperatura, altitud y las componentes del viento, obtenidas mediante estaciones climatológicas, globos, naves aéreas, embarcaciones y boyas.

A pesar de que la distribución de la precipitación de MERRA es bastante buena, existen sesgos remanentes en la climatología de largo plazo, particularmente en el ciclo diurno, que presentan un impacto severo en las estimaciones de humedad del suelo. En este sentido, tres deficiencias, en particular, han sido identificadas (Rienecker *et al.*, 2011; Yi *et al.*, 2011):

1. las intensidades de precipitación de MERRA son inferiores a las observadas y tienden a mostrarse como lloviznas persistentes;
2. las precipitaciones de MERRA tienden a ser mayores a mitad del día, mientras que las observaciones muestran frecuentemente máximos de lluvia nocturnos;
3. la radiación solar de MERRA durante eventos diurnos de precipitación no es tan reducida como en las observaciones.

El resultado de estas tres deficiencias, en conjunto, es una inmediata reevaporación de gran parte de la lluvia proveniente de las gotas retenidas en la superficie del dosel vegetal, lo que implica que el agua que cae a través del dosel puede ser insuficiente para infiltrarse en el suelo o contribuir en el escurrimiento superficial.

El sistema de asimilación de datos de MERRA quedó “congelado” en 2008 y resulta incapaz

de incorporar una gran cantidad de nuevos tipos de datos. A medida que los instrumentos más antiguos en los satélites comenzaron a fallar, el número disponible de observaciones para asimilación en MERRA ha decrecido rápidamente. Por tal motivo, en 2014 fue lanzada una nueva versión del producto: MERRA-2. El nuevo sistema incluye la asimilación de la radiación hiperspectral y observaciones de microondas, así como conjuntos de datos de radioocultación de GPS, y avances en el modelo GEOS-5 y su sistema de asimilación de datos. Además, MERRA-2 usa datos de precipitación basados en observaciones como forzamiento para la parametrización de la superficie terrestre (Bosilovich, Lucchesi y Suarez, 2016).

El presente estudio ha hecho uso del producto de reanálisis MERRA-*Land 2*, que consiste exclusivamente en la componente terrestre de MERRA-2. Esto es, el resultado de la aplicación de MERRA-2 desacoplado del modelo atmosférico para generar campos de hidrología terrestre. Las estimaciones de MERRA-*Land 2* se ven beneficiadas por el uso de valores revisados de los parámetros del modelo de intercepción de lluvia.

La ecuación de balance de agua realizado en la componente terrestre puede ser escrita como sigue:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = P_l + P_s - E_L - R_L + \mathfrak{R}_W \quad (3.1)$$

donde  $W$  es el total de agua retenida en todos los almacenamientos de la superficie terrestre (incluyendo el suelo, la intercepción y la capa de nieve)  $P_l$  y  $P_s$  son la intensidad de lluvia líquida y precipitación en forma de nieve, respectivamente,  $E_L$  es la tasa total de evapotranspiración,  $R_L$  es el escurrimiento superficial total más el gasto base, y  $\mathfrak{R}_W$  es una fuente o sumidero numérico de agua.

Por otra parte, la ecuación del balance de energía total en la superficie terrestre se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = SW_L + LW_L - SH_L - L_v E_L - L_f \Delta SWE + \mathfrak{R}_L \quad (3.2)$$

donde  $\epsilon$  es el contenido total de calor (en el suelo, el dosel vegetal y capa de nieve) relativo al agua líquida.  $SW_L$  es la radiación de onda corta neta,  $LW_L$  es la radiación de onda larga neta,  $L_v$  es el calor latente de vaporización (del líquido),  $E_L$  es la evaporación total desde la superficie terrestre,  $SH_L$  es el flujo de calor sensible desde la superficie terrestre,  $L_f$  es el calor latente de fusión, y  $\Delta SWE$  es el cambio en el equivalente de agua de la nieve (a través de la adición de precipitación congelada cayendo en la superficie o remoción de nieve mediante derretimiento o sublimación). Por lo tanto, el término  $L_f \Delta SWE$  considera la energía de deshielo y la energía agregada necesaria para la evaporación a partir de agua

sólida, en lugar de líquida.

El término  $\mathfrak{R}_L$  contiene fuentes y sumideros numéricos de energía asociados con una gran cantidad de pequeñas inconsistencias entre los modelos acoplados. Por ejemplo, cuando la misma cantidad de nieve se precipita en una región a  $-20^\circ\text{C}$  y en una segunda región a  $0^\circ\text{C}$ , es necesaria mayor energía en la primera región para derretir la nieve, dado que ahí se necesita, primero, energía para calentar la nieve hasta  $0^\circ\text{C}$ . El modelo atmosférico no distingue entre el contenido de energía de la nieve cayendo a  $-20^\circ\text{C}$  y aquella cayendo a  $0^\circ\text{C}$ , mientras que el modelo terrestre sí considera esta diferencia de energía. Para rectificar esta inconsistencia entre los modelos terrestre y atmosférico, la “energía negativa” de la nieve más fría (*i. e.*, el déficit de energía relativo a la nieve a  $0^\circ\text{C}$ ) es “inventada” y agregada a la energía interna de la nieve tan pronto como llega a la superficie (Bosilovich, Lucchesi y Suarez, 2016).

El cálculo de todos los campos es llevado a cabo con el modelo GEOS-5 usando una malla de esfera cubcada con resolución aproximada de  $50\text{ km} \times 50\text{ km}$ . Sin embargo, las colecciones de datos publicadas están espacialmente interpoladas a la malla latitud-longitud para un manejo más sencillo.

Los conjuntos de datos de MERRA-2 comprenden el periodo desde enero de 1980 y hasta la fecha, actualizándose de manera mensual. Pueden obtenerse en escala temporal horaria y mensual en el sitio web del Centro de Datos de Ciencias de la Tierra y Servicios de Información de Goddard (GES DISC; <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov>).

### 3.2. Índices estandarizados de sequía

La definición de sequía adoptada en este estudio es la propuesta por McKee, Doesken y Kleist (1993), basada en las variables hidrológicas estandarizadas. Una variable hidrológica estandarizada consiste en la diferencia que existe entre el valor analizado y la media, dividida entre la desviación estándar, donde la media y la desviación estándar son determinadas a partir de los registros históricos con suficiente información. Este enfoque presenta una serie de ventajas, mismas que fueron mencionadas en el capítulo anterior. No obstante, cuenta con una potencial limitación en asumir que existe una función de distribución de probabilidad paramétrica para modelar los datos de precipitación (Angelidis *et al.*, 2012; Farahmand y AghaKouchak, 2015).

Típicamente, el índice estandarizado de precipitación (SPI), del que se desprenden el resto de los índices estandarizados de sequía para otras variables hidrológicas, es derivado mediante el

ajuste de una función de distribución de probabilidad Gamma a los datos de precipitación. La probabilidad Gamma acumulada es luego transformada a la función de distribución acumulada (CDF) de la distribución normal estándar.

El SPI original describe la distribución de frecuencia de precipitación usando una función de densidad de probabilidad Gamma de dos parámetros:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (3.3)$$

donde  $\Gamma(\alpha)$  es una función Gamma, y  $x$  denota a la acumulación de precipitación.  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de forma y escala de la distribución Gamma que pueden ser estimados usando el método de máxima verosimilitud u otros. La probabilidad acumulada  $G(x)$  puede ser simplificada como la función de distribución acumulada Gamma incompleta, suponiendo  $t = \frac{x}{\beta}$  (Edwards y McKee, 1997):

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (3.4)$$

Dado que la Ecuación 3.4 no es válida para la precipitación nula ( $x = 0$ ), la distribución de probabilidad acumulada completa, incluyendo ceros, puede ser expresada como:  $H(x) = q + (1 - q)G(x)$ , donde  $q$ , y  $1 - q$  son las probabilidades de precipitación nula ( $x = 0$ ), y precipitación mayor que cero ( $x \neq 0$ ). Posteriormente, el SPI es calculado transformando  $H(x)$  a la distribución normal estándar con media de cero y varianza de uno (McKee, Doesken y Kleist, 1993). Una secuencia de SPI positivos indica un periodo húmedo, y una secuencia de valores negativos representa a un periodo seco.

A pesar de ser frecuentemente usada, la distribución Gamma de dos parámetros puede no ser la mejor distribución (Guttman, 1999; Quiring, 2009; Farahmand y AghaKouchak, 2015). Farahmand y AghaKouchak (2015) propusieron simplificar la obtención de la probabilidad acumulada empleando la ecuación de punteo de Gringorten (1963), que se expresa como sigue:

$$p(x_i) = \frac{i - 0.44}{n + 0.12} \quad (3.5)$$

donde  $n$  es el tamaño de la muestra,  $i$  denota la posición del dato de precipitación no nula en orden ascendente, y  $p(x_i)$  es la probabilidad empírica correspondiente.

Así como la ecuación de Gringorten, existen otros métodos no paramétricos para calcular frecuencias (en este caso, probabilidad de no excedencia). La mayoría de ellos tienen la forma general  $p = (i - a)/(n + 1 - 2a)$ , donde  $a$  varía entre 0.0 y 0.5 (Helsel e Hirsch, 2002).

Entre las más usadas se encuentran:

- Weibull (1939)

$$p = \frac{i}{n+1}, a = 0$$

- Blom (1958)

$$p = \frac{i - 0.375}{n + 0.25}, a = 0.375$$

- Cunnane (1978)

$$p = \frac{i - 0.4}{n + 0.2}, a = 0.4$$

- Hazen (1913)

$$p = \frac{i - 0.5}{n}, a = 0.5$$

además de la de Gringorten (1963), en la que  $a = 0.44$ . La elección de una fórmula de punteo cobra mayor relevancia cuando el tamaño de la muestra ( $n$ ) es reducido. Sin embargo, en el análisis de series de tiempo extensas, como es el caso en el estudio de sequías, las distintas técnicas empíricas resultan en valores similares (Turnbull, 1976).

Una vez obtenido el valor de la probabilidad, el índice estandarizado (SI) se determina como sigue:

$$SI = \phi^{-1}(p) \quad (3.6)$$

donde  $\phi$  es la función de distribución normal estándar, y  $p$  es la probabilidad derivada de la Ecuación 3.5.

La interpretación original de los valores del SPI, propuesta por McKee, Doesken y Kleist (1993), consideró un arreglo de umbrales para identificar cuatro categorías de intensidad del evento de sequía, a saber: sequía leve, moderada, severa y extrema (Cuadro 2.3). No obstante, este estudio ha adoptado la clasificación empleada en el *North American Drought Monitor* (Monitor de Sequía de Norteamérica, NADM; Svoboda *et al.*, 2002) y usada por el Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN), que considera cinco clasificaciones de intensidad de sequía e incorpora un criterio análogo al déficit para el superávit de humedad (anormalmente húmedo, moderadamente húmedo, severamente húmedo, etc.). Esta clasificación se muestra en el Cuadro 3.1

La principal ventaja del uso de la clasificación del NADM está en los periodos de retorno asociados a sus umbrales, que son, aproximadamente, los convencionalmente usados en México en los estudios de frecuencia de eventos hidrológicos extremos (Domínguez Mora *et*

Cuadro 3.1: Categorías de intensidad de sequía y humedad en función del valor del índice estandarizado de sequía usado por el Monitor de Sequía de Norteamérica (Svoboda *et al.*, 2002).

| Rango                 | Clave | Categoría               |
|-----------------------|-------|-------------------------|
| $SI \leq -2.0$        | D4    | Sequía excepcional      |
| $-2.0 < SI \leq -1.6$ | D3    | Sequía extrema          |
| $-1.6 < SI \leq -1.3$ | D2    | Sequía severa           |
| $-1.3 < SI \leq -0.8$ | D1    | Sequía moderada         |
| $-0.8 < SI \leq -0.5$ | D0    | Anormalmente seco       |
| $-0.5 < SI < 0.5$     |       | Normal                  |
| $0.5 \leq SI < 0.8$   | W0    | Anormalmente húmedo     |
| $0.8 \leq SI < 1.3$   | W1    | Moderadamente húmedo    |
| $1.3 \leq SI < 1.6$   | W2    | Severamente húmedo      |
| $1.6 \leq SI < 2.0$   | W3    | Extremadamente húmedo   |
| $SI \geq 2.0$         | W4    | Excepcionalmente húmedo |

*al.*, 2003) — $|SI| = 0.8 \sim T_r = 5$  años;  $|SI| = 1.3 \sim T_r = 10$  años;  $|SI| = 1.6 \sim T_r = 20$  años;  $|SI| = 2.0 \sim T_r = 50$  años—.

La metodología considera como sequía a un periodo continuo de valores negativos de SI en el que se haya alcanzado, al menos, un valor inferior o igual que  $-0.8$ . El inicio de la sequía se define en el mes correspondiente al primer valor negativo del SI, mientras que su término se define en el siguiente mes con valor positivo.

### 3.3. Análisis multivariado de sequías

Existe una gran cantidad de estudios que sustentan que el uso de un solo índice de sequía puede ser insuficiente para describir todos los aspectos del inicio, persistencia y terminación de una sequía (Dracup, Lee y Paulson Jr., 1980; Kao y Govindaraju, 2010; Hao y Agha-Kouchak, 2013; AghaKouchak, 2015). Se sabe que la humedad del suelo ejerce un papel principal en la modelación y predicción de la persistencia de la sequía (Oglesby y Erickson III, 1989; E. R. Cook *et al.*, 2007) y, por otro lado, el inicio de una sequía meteorológica ocurre algunos meses antes que la sequía agrícola para el mismo evento (Mo, 2011). A la luz de estos resultados, el análisis combinado del déficit de dos (o más) variables hidrológicas distintas (*e. g.*, precipitación y humedad del suelo) permite identificar diversos aspectos de un mismo evento (*e. g.*, inicio y persistencia).

### 3.3.1. Índice Estandarizado Multivariado de Sequía

Hao y AghaKouchak (2013) propusieron un Índice Estandarizado Multivariado de Sequía (MSDI), que es una versión extendida del SPI, con el objetivo de combinar la información obtenida de dos (o más) variables relacionadas con la sequía (*e. g.*, precipitación y humedad del suelo) usando la función de distribución conjunta de ambas variables. Suponiendo dos variables aleatorias  $X$  y  $Y$ , propusieron el uso de una función cópula  $C$  para determinar la distribución conjunta con la probabilidad conjunta acumulada  $p$ , como sigue:

$$P(X \leq x, Y \leq y) = C[F(X), G(Y)] = p \quad (3.7)$$

donde  $C$  es la función cópula, y  $F(X)$  y  $G(Y)$  son las funciones de distribución de la probabilidad marginal acumulada de las variables aleatorias  $X$  y  $Y$ , respectivamente. Una vez que se conoce la probabilidad conjunta acumulada  $p$ , el MSDI puede ser definido con la siguiente expresión, análoga a la Ecuación 3.6:

$$MSDI = \phi^{-1}(p) \quad (3.8)$$

donde  $\phi$  es la función de distribución normal estándar.

De forma similar a la definición del SI, una secuencia de valores negativos del MSDI indica que las condiciones climáticas son secas (*i. e.*, sequía), mientras que una secuencia de valores positivos representa una condición climática húmeda. Un MSDI cercano a cero indica condiciones climáticas normales.

Una desventaja de este procedimiento radica en el uso de funciones cópula para la obtención de la probabilidad conjunta acumulada  $p$ , lo que requiere la estimación de parámetros y la implementación de pruebas de bondad de ajuste. Para reducir la carga de cálculo y evitar hacer suposiciones con respecto a las familias de cópulas, es posible extender el enfoque hacia un contexto no paramétrico (Hao y AghaKouchak, 2014).

Sean dos variables relacionadas con la sequía  $X$  y  $Y$ . La distribución bivariada de probabilidad puede ser definida como  $p_j = P(X \leq x, Y \leq y)$ , donde  $p_j$  es la probabilidad conjunta de  $X$  y  $Y$ . La probabilidad empírica puede ser derivada usando el modelo multivariado de punteo de Gringorten, presentada por Yue *et al.* (1999). Primero, es construida una tabla bidimensional en la que las variables  $X$  y  $Y$  están acomodadas en orden ascendente. El elemento de la fila  $i$  y columna  $j$  de la tabla es definido como la función de frecuencia

acumulada de las dos variables aleatorias y es estimada con la siguiente ecuación:

$$f(x_i, y_j) = P(X = x_i, Y = y_j) = \frac{n_{ij}}{N + 0.12} \quad (3.9)$$

donde  $N$  es el número total de observaciones y  $n_{ij}$  es el número de ocurrencias de la combinación de  $x_i$  con  $y_j$ . La probabilidad conjunta de no excedencia está dada por:

$$F(x, y) = P(X \leq x_i, Y \leq y_j) = \frac{\sum_{m=1}^i \sum_{l=1}^j n_{ml} - 0.44}{N + 0.12} \quad (3.10)$$

donde  $\sum_{m=1}^i \sum_{l=1}^j n_{ml}$  representa al número de pares de observaciones en los que  $X \leq x_i$  y  $Y \leq y_j$ . Una vez que la probabilidad conjunta ha sido calculada con la Ecuación 3.10, se emplea como entrada para calcular el MSDI (Ecuación 3.8).

Además de mejorar la identificación del inicio y persistencia de un evento, el análisis conjunto de la probabilidad de múltiples variables tiene dos implicaciones principales al momento de evaluar la severidad de las sequías (Hao y AghaKouchak, 2013):

- el MSDI es capaz de identificar una sequía, aun cuando las distintas variables analizadas presenten valores cercanos a un umbral de alerta definido, pero sin alcanzarlo. Esto se debe a que la probabilidad conjunta tiene un mayor espacio probabilístico que la probabilidad marginal de cada una de las variables;
- en caso de que todas las variables analizadas alcancen el umbral de alerta, el MSDI otorgará un mayor grado de severidad a las condiciones de sequía que si fueran éstas analizadas por separado (*e. g.*, mediante el SPI, SSI, etc.). Esto es un reflejo de la excepcionalidad de observar simultáneamente valores críticos en más de un indicador.

En el presente estudio se han calculado y comparado resultados de tres combinaciones de variables para el MSDI. Con el objetivo de agilizar la referencia a cada una de las combinaciones, se ha adoptado la nomenclatura mnemotécnica siguiente:

**MSDI-PreRun:** Índice Estandarizado Multivariado de Sequía para las variables de precipitación (*precipitation*) y escurrimiento (*runoff*).

**MSDI-PreSMo:** Índice Estandarizado Multivariado de Sequía para las variables de precipitación (*precipitation*) y humedad del suelo (*soil moisture*).

**MSDI-PreSMoRun:** Índice Estandarizado Multivariado de Sequía para las variables de precipitación (*precipitation*), humedad del suelo (*soil moisture*) y escurrimiento (*runoff*).

Además, se presentan los resultados de los índices estandarizados univariados, derivados con la metodología del SPI, descrita en el capítulo anterior. Éstos son:

**SPI:** Índice Estandarizado de Precipitación (*Standardized Precipitation Index*).

**SRI:** Índice Estandarizado de Escurrimiento (*Standardized Runoff Index*).

**SSI:** Índice Estandarizado de Humedad del Suelo (*Standardized Soil Moisture Index*).

En todos los casos, cuando se hace referencia a los resultados correspondientes a alguna escala temporal de cálculo, ésta se agrega como un subíndice al nombre del índice. Por ejemplo, SPI<sub>06</sub> se refiere al Índice Estandarizado de Precipitación calculado con una escala temporal de seis meses; MSDI-PreSMo<sub>01</sub> es el Índice Estandarizado Multivariado de Sequía para las variables de precipitación y humedad del suelo calculado con una escala temporal de un mes; etc.

La Figura 3.1 muestra ejemplos de los resultados de los distintos MSDI. En la Figura 3.1a se compara el MSDI-PreRun con los resultados de los índices SPI y SRI; la Figura 3.1b compara el MSDI-PreSMo con los índices SPI y SSI; finalmente, la Figura 3.1c muestra el MSDI-PreSMoRun en comparación con los índices SPI, SRI y SSI. Uno de los rasgos más característicos de las gráficas es que el índice multivariado se aprecia sistemáticamente inferior a los índices univariados de las variables que lo componen. Este fenómeno no es una regla, es posible que la probabilidad conjunta acumulada de dos (o más) variables sea superior a la probabilidad acumulada marginal de cada una de ellas. No obstante, el espacio probabilístico en el que esto ocurre se ve reducido conforme aumentan las variables involucradas, por lo que su ocurrencia es poco común.

En esta figura se ve confirmado el rol de la humedad del suelo en la persistencia de la sequía. Al analizar el periodo seco del segundo semestre de 2015 mediante el MSDI-PreRun, se detecta la terminación de la sequía durante el mes de noviembre de 2015, lo que representa una sequía con duración de cinco meses. No obstante, el SSI detecta un déficit de humedad del suelo durante dicho mes por lo que el MSDI-PreSMo determina una duración de nueve meses para el mismo periodo seco, que se ve culminado en marzo de 2016.

Otro aspecto a notar es que en el ejemplo el MSDI-PreSMo y el MSDI-PreSMoRun son muy semejantes, lo que implica que la influencia del SRI en el índice trivariado es muy pequeña. Esto puede ser indicativo de cuencas donde el flujo subsuperficial es muy reducido o nulo y las fluctuaciones del escurrimiento corresponden directamente a los pulsos de la precipitación. En sitios donde existe un alto componente de gasto base, la serie de tiempo del

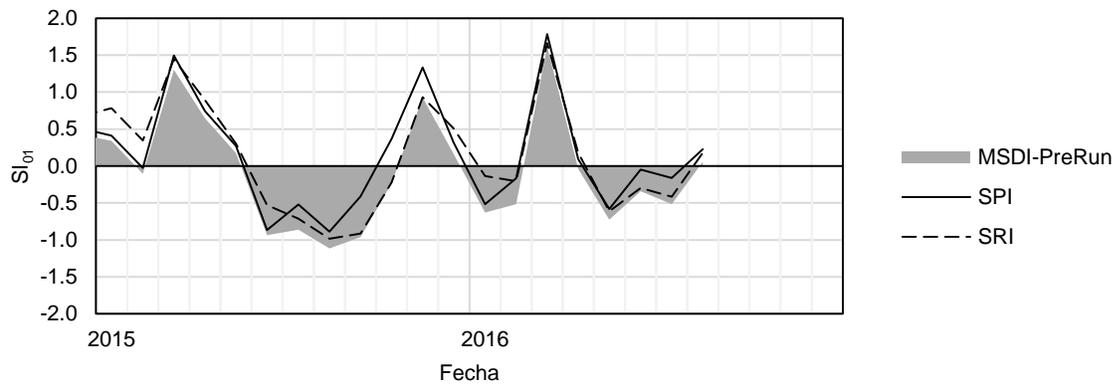
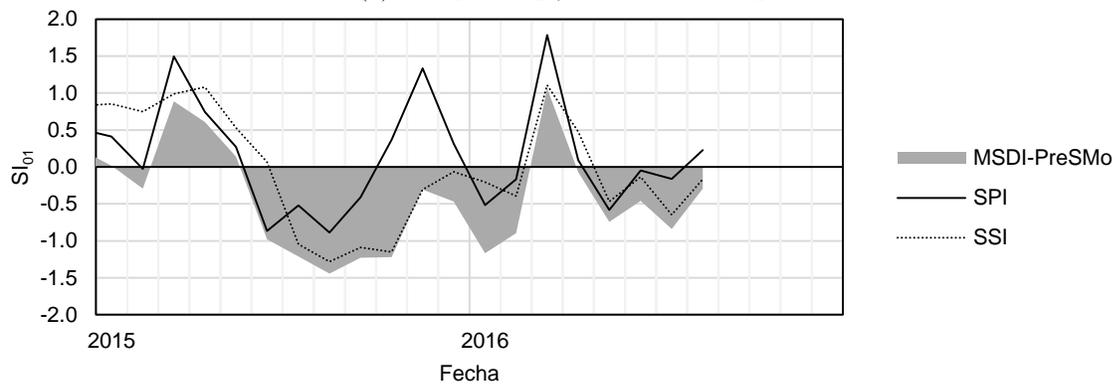
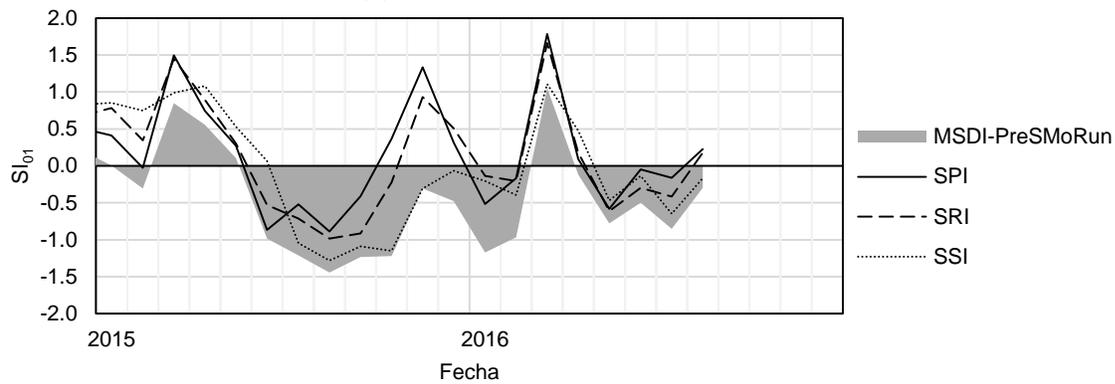
(a)  $SPI_{01}$ ,  $SRI_{01}$  y  $MSDI-PreRun_{01}$ .(b)  $SPI_{01}$ ,  $SSI_{01}$  y  $MSDI-PreSMo_{01}$ .(c)  $SPI_{01}$ ,  $SRI_{01}$ ,  $SSI_{01}$  y  $MSDI-PreSMoRun_{01}$ .

Figura 3.1: Variación temporal de los índices estandarizados de sequía promedio en el estado de Oaxaca en el periodo 2015-2016.

escurrimiento puede mostrar una variabilidad distinta a la de la precipitación y, así, ejercer una mayor influencia en la intensidad de la sequía calculada con el MSDI-PreSMoRun.

Convencionalmente, para el uso de indicadores en distintas aplicaciones se reportan diferentes escalas temporales de los índices estandarizados de sequía. En general, los índices de escalas temporales de 3 meses (*i. e.*,  $SPI_{03}$ ,  $SRI_{03}$  y  $SSI_{03}$ ) son útiles en el análisis del balance estacional de agua; así mismo, los índices con escalas temporales de 12 meses (*i. e.*,  $SPI_{12}$ ,  $SRI_{12}$  y  $SSI_{12}$ ) permiten evaluar el balance de agua durante un año hidrológico completo, sin considerar eventos de corta duración.

La Organización Mundial Meteorológica (2012) ha propuesto una interpretación para las escalas temporales del SPI. Por ejemplo, el  $SPI_{03}$  sirve como indicador de humedad del suelo; el  $SPI_{06}$  puede ser asociado con anomalías en flujos en cauces naturales y niveles en embalses; el  $SPI_{12}$  sugiere efectos en cauces, almacenamientos e, incluso, en los niveles de acuíferos. Desde este enfoque, la aplicación de escalas temporales al cálculo del SPI funge como un filtro numérico que modula una señal de entrada (serie de tiempo de precipitación) para generar una señal de salida con un efecto acumulativo de la información de entrada y desfasada en el tiempo (asociada al comportamiento de la humedad del suelo o el escurrimiento). A través de éste “filtro” es posible simular con relativa eficiencia la propagación de la sequía en el sistema hidrológico. La Figura 3.2 muestra un ejemplo en que la serie de tiempo del  $SPI_{03}$  se asemeja en gran medida al  $SSI_{01}$ . Sin embargo, esta interpretación puede perder validez en distintas regiones e, incluso, en distintas estaciones del año (Shukla y A. W. Wood, 2008), por lo que resulta de carácter indicativo. Además, el uso de integraciones temporales acumula valores que pueden no tener influencia en las condiciones actuales del proceso hidrológico y provocar un efecto de retraso en el inicio o terminación de un periodo seco (o húmedo) en la serie de tiempo del índice estandarizado (Shukla y A. W. Wood, 2008).

El efecto de propagación de sequía puede ser detectado a través del MSDI con una escala temporal de 1 mes, de modo que se vea la fluctuación de cada variable en cada paso de tiempo. Hao y AghaKouchak (2014) mostraron la eficiencia de este método para detectar el inicio y la persistencia de un periodo seco con el uso de dos variables (precipitación y humedad del suelo). En este estudio se ha evaluado la eficiencia del enfoque con el análisis conjunto de tres variables (precipitación, humedad del suelo y escurrimiento), con el objetivo de detectar el proceso de propagación desde la sequía meteorológica hasta la sequía hidrológica (ver la Figura 2.1). La incorporación de una variable asociada al almacenamiento en acuíferos permitiría identificar el proceso de propagación hasta la sequía hidrogeológica. Sin embargo, esta componente no ha sido considerada en este estudio.

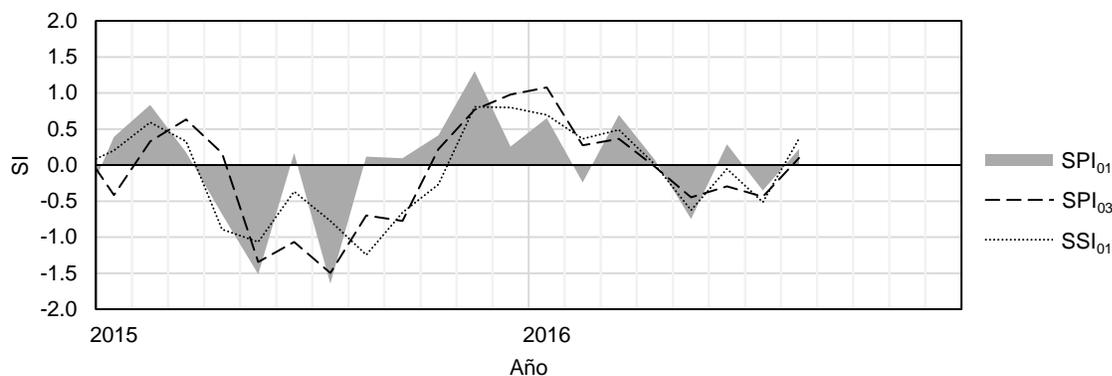


Figura 3.2: Ajuste del SPI<sub>03</sub> con el SSI<sub>01</sub> correspondientes a los índices promedio en el estado de Yucatán, en el periodo 2015-2016.

### 3.4. Magnitud de periodos secos

El análisis de la variación de los índices estandarizados de sequía permite identificar el inicio y terminación de un evento a través de la cuantificación de la intensidad del déficit o superávit en cada paso de tiempo considerado. No obstante, la caracterización de un evento completo, cuya duración comúnmente es mayor que un paso de tiempo, es definida con ayuda de la *magnitud*. Conociendo esta propiedad, es posible comparar los impactos ocurridos (registro histórico) o esperados (pronóstico) durante distintos eventos, así como asignarles una frecuencia. En el Capítulo 2 fue definido este término. En esta sección se describirá la metodología seguida para su análisis, así como su aplicación para el monitoreo de sequías.

La magnitud de un periodo seco puede ser definida gráficamente como el área comprendida entre la serie temporal del índice estandarizado (SI) y el eje que representa a las condiciones “normales” —mediana de la muestra,  $SI = 0$ —, expresada matemáticamente con la Ecuación 2.1.

McKee, Doesken y Kleist (1993) obtuvieron la magnitud de la sequía meteorológica a partir de registros históricos de precipitación. En este trabajo, la magnitud de sequía ha sido analizada empleando el MSDI trivariado. La motivación para el uso de dicho índice es conseguir un indicador general de magnitud que incorpore la sucesión de efectos derivados, en principio, por un déficit en la precipitación y que continúa a través del proceso hidrológico hasta afectar al contenido de humedad del suelo y el flujo en cauces y embalses. Así, se utiliza el proceso de propagación de la sequía para dar seguimiento a la presencia de consecuencias debidas al fenómeno, las cuales son registradas en las pérdidas ambientales y económicas.

La magnitud de sequía ( $M$ ) determinada con la Ecuación 2.1 lleva implícita la definición de un valor umbral de intensidad de sequía,  $SI_u = -1$ . La ecuación, en su forma completa, podría expresarse como sigue, para cualquier SI:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n SI_i^{(ts)}}{SI_u} \quad (3.11)$$

donde  $i$  y  $n$  son el primer y último paso de tiempo, respectivamente, con  $SI < 0$ , para la escala temporal  $ts$ . Según este criterio,  $M$  equivale al número de meses que duraría el periodo seco estudiado si cada paso de tiempo presentara una intensidad  $SI_u$  (McKee, Doesken y Kleist, 1993). En este estudio se ha propuesto evaluar  $M$  con un umbral  $SI_u = -1.3$ , para que la magnitud sea interpretada como el número de meses que duraría el evento si se tratara de una *sequía severa* persistente.

Un mapa de magnitud resulta una herramienta útil para identificar zonas con mayor persistencia de sequía, de tal suerte que sea posible otorgar prioridad de atención a zonas más afectadas. Lo anterior resulta de gran importancia en casos en los que grandes extensiones espaciales presentan la misma intensidad de sequía. Ante este escenario, la magnitud ( $M$ ) refleja la intensidad de la sequía acumulada en toda la duración de un evento, por lo que es de esperarse que las regiones que han permanecido durante más (menos) tiempo en condiciones de sequía presenten una mayor (menor) magnitud. Así mismo, el análisis de las series de tiempo de magnitud, permite comparar la severidad de distintos eventos de sequía en función de sus intensidades y su duración, de manera objetiva y cuantitativa.

### 3.5. Elaboración de mapas de sequía

Usualmente, los mapas son la mejor manera de comunicar a los tomadores de decisiones la información basada en un contexto geográfico.

La elaboración de mapas de sequía se llevó a cabo aplicando las metodologías descritas en este capítulo a los conjuntos de datos mallados de los productos de asimilación de datos consultados. La Figura 3.3 muestra un esquema del arreglo en que fueron ordenados los valores obtenidos de los productos consultados. La extensión espacial de los valores extraídos corresponde al recuadro que delimita al territorio nacional, esto es, entre  $86^\circ$  y  $119^\circ$  longitud Oeste y  $14^\circ$  y  $34^\circ$  latitud Norte. Siguiendo la nomenclatura de la Figura 3.3,  $I = \{i_{\text{lat}} : 14^\circ\text{N} < \text{lat} < 34^\circ\text{N}\}$  y  $J = \{j_{\text{lon}} : 86^\circ\text{W} < \text{lon} < 119^\circ\text{W}\}$ . Por otro lado, el periodo de datos disponibles es distinto para cada producto, pero en todos los casos fue analizado el total de la extensión temporal disponible. De este modo,  $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$  es la lista

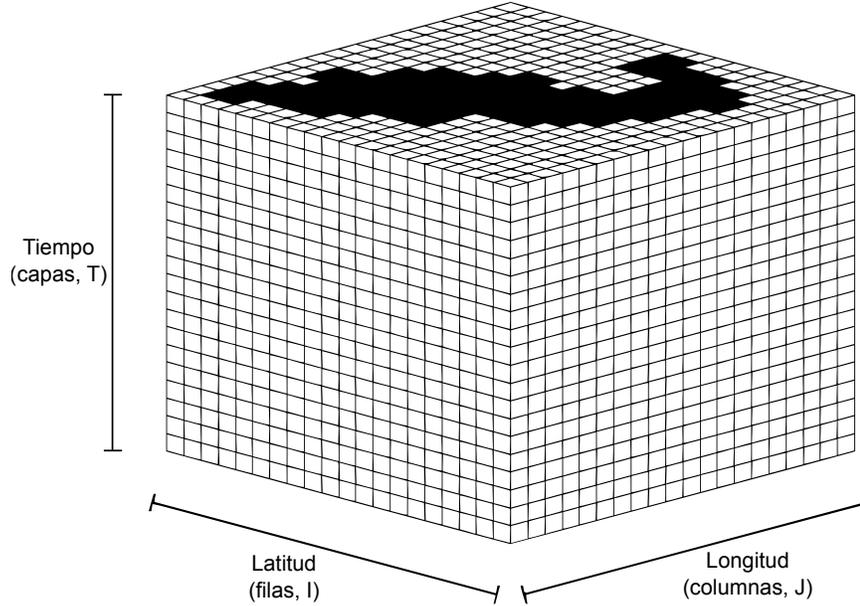


Figura 3.3: Arreglo de los datos extraídos de los productos mallados.

de los periodos disponibles en cada producto. Por ejemplo, para las variables derivadas de MERRA-2,  $T$  es:

$$T = \text{enero/1980, febrero/1980, marzo/1980, ..., presente} \quad (3.12)$$

A partir del arreglo descrito, se calcularon los índices estandarizados tomando como base la serie de tiempo  $X$  correspondiente a cada pareja de coordenadas  $(i, j)$ , es decir,  $X^{(i,j)} = \{x_t^{(i,j)} : t \in T\}$ . En el caso del análisis multivariado, las series de tiempo están formadas por grupos —parejas o triadas— de valores. Por ejemplo, sean  $X$  y  $Y$  dos variables analizadas en conjunto, la serie de tiempo  $(X, Y)^{(i,j)}$  estará formada por los siguientes elementos:

$$(X, Y)^{(i,j)} = \left\{ \left( x_1^{(i,j)}, y_1^{(i,j)} \right), \left( x_2^{(i,j)}, y_2^{(i,j)} \right), \left( x_3^{(i,j)}, y_3^{(i,j)} \right), \dots, \left( x_n^{(i,j)}, y_n^{(i,j)} \right) \right\} \quad (3.13)$$

o, usando la misma notación que en la serie de tiempo univariada, también puede expresarse como

$$(X, Y)^{(i,j)} = \left\{ (x, y)_t^{(i,j)} : t \in T \right\} \quad (3.14)$$

Las series de tiempo de los índices de sequía calculados fueron ordenadas en un arreglo similar al de los datos de entrada (Figura 3.3), de modo que cada capa ( $t$ ) formó un mapa de SI con el resultado para cada pareja de coordenadas  $(i, j)$ .

El arreglo de resultados fue remuestreado con una resolución de  $1/16^\circ$  para conseguir un efecto “natural” de la variación espacial de los SI en los mapas generados. Las técnicas de interpolación más usadas para la generación de mapas de variables hidroclimatológicas son los métodos Kriging, Spline y la Distancia Inversa Ponderada (IDW). Estas técnicas requieren una importante carga de cómputo y, debido al gran volumen de información por procesar, en este estudio se aplicó una interpolación lineal, cuyo cómputo es significativamente más sencillo. No obstante, la generación de mapas con otras técnicas de interpolación deberá ser considerada en trabajos futuros.

La Figura 3.4 muestra un ejemplo de los mapas generados, en los que se ofrece una definición cualitativa del déficit de humedad (colores cálidos) o superávit (colores fríos). La escala de colores clasifica el grado en que la presencia de agua en cada sitio se aleja de las condiciones “normales”. Desde esta óptica, D4 (color más cálido) es la condición con mayor déficit de agua (conocida como *sequía excepcional*), mientras que W4 (color más frío) es la condición con mayor superávit de agua (denominada *excepcionalmente húmedo*). La capacidad de representar en un solo índice ambos aspectos es una de las principales bondades de los índices estandarizados de sequía. Líneas de estudio adicionales podrían buscar establecer una interpretación operacional de la intensidad y magnitud de los periodos de superávit de humedad.

Interpretada desde una perspectiva cuantitativa, cada clasificación tiene asignado un rango de probabilidad de ocurrencia y periodo de retorno, como se mencionó en la Sección 3.2. Tomando de nuevo el ejemplo de las condiciones extremas, una región en la que se observa una clasificación D4 (W4) está pasando por un periodo seco (húmedo) cuya intensidad tiene una probabilidad de excedencia (empírica, por la metodología seguida en este estudio) de  $P \leq 0.023$  y un periodo de retorno  $T \geq 50$  años. Este enfoque ofrece una noción más precisa de la gravedad de cada condición.

Esta información es esencial para el monitoreo de sequías, ya que puede ser usada para alertar a los tomadores de decisiones acerca del inicio de un evento.

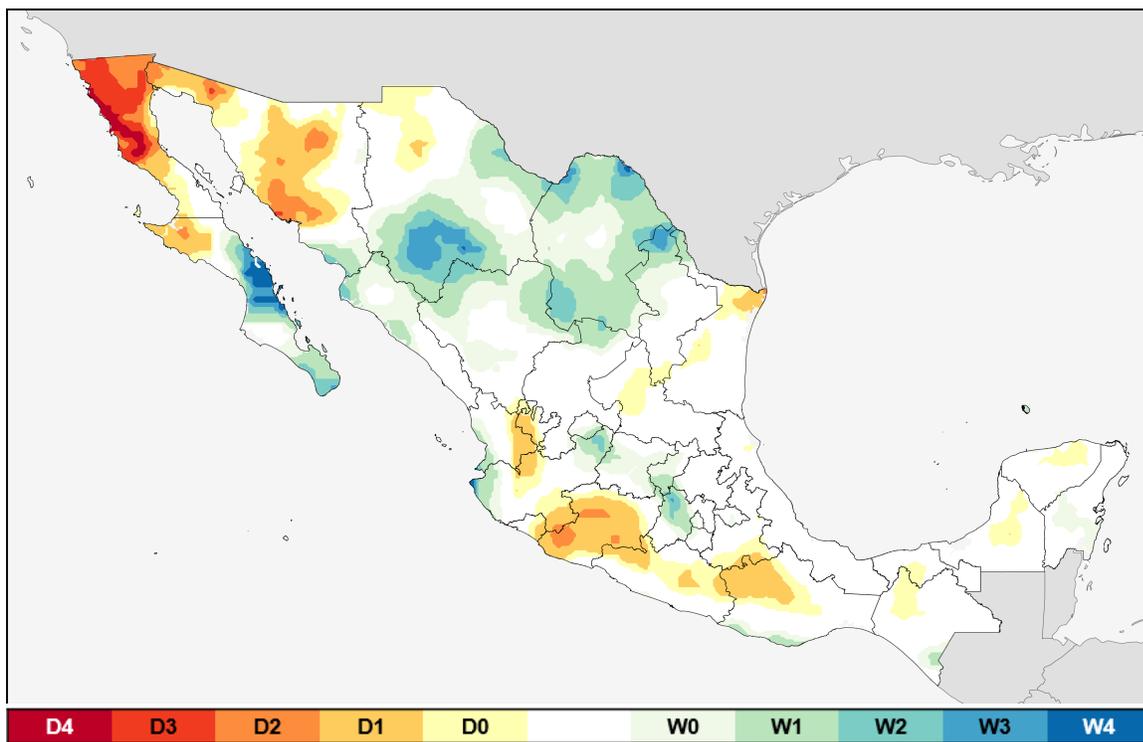


Figura 3.4: Mapa del MSDI-PreSMo<sub>01</sub> en México en agosto de 2016.

## Capítulo 4

# Resultados

### 4.1. Evaluación de los productos de asimilación de datos

La calidad de las series de tiempo de variables hidrológicas es de crítica importancia en el análisis de sequías, como en todo estudio hidrológico. Todo modelo, aun cuando sus bases físicas estén correctamente fundadas, producirá resultados erróneos si la información de entrada no caracteriza adecuadamente la magnitud y variación de la variable que reporta. Esto es conocido como *razonamiento GIGO* (*Garbage In, Garbage Out*, trad: “Basura entra, basura sale”; Beven, 2012).

Con esto en mente, se ha llevado a cabo una evaluación de las variables hidrológicas derivadas de los productos de asimilación de datos (AD) MERRA-2, GLDAS-1 y GLDAS-2, usadas como insumo para este análisis de sequías en México. Los resultados de análisis preliminares —que no se reportan en este documento— mostraron que las series de tiempo correspondientes a los distintos modelos aplicados por GLDAS (*i. e.*, CLM, Mosaico, NOAH y VIC) guardan una estrecha semejanza entre sí, con un desempeño ligeramente mejor observado en NOAH. Por lo tanto, el resto de los modelos ha sido omitido de esta evaluación.

Las series de tiempo derivadas de estos productos han sido comparadas con las de las observaciones *in situ* de precipitación y escurrimiento obtenidas de la red de estaciones hidrométricas y climatológicas. Debido a la falta de información para evaluar la humedad del suelo, en este estudio se asumirá que la calidad de la información correspondiente a dicha variable es similar a la del resto evaluadas. Los aspectos analizados fueron la magnitud absoluta de los valores y su variabilidad. Éste último, evaluado por medio del índice

estandarizado de sequía correspondiente (*i. e.*, SPI para la precipitación y SRI para el escurrimiento). El análisis de la sequía mediante los índices empleados en este estudio depende en mayor grado de la variabilidad de los indicadores hidrológicos que en sus valores absolutos.

Los productos de AD evaluados fueron:

- GLDAS-1 (modelo NOAH con resolución  $1.00^\circ \times 1.00^\circ$ , 1979-presente)
- GLDAS-2 (modelo NOAH con resolución  $1.00^\circ \times 1.00^\circ$ , 1979-presente)
- MERRA-2 (resolución  $1/2^\circ \times 2/3^\circ$ , 1980-presente)

El criterio seguido para la selección de las estaciones climatológicas usadas en la evaluación de la precipitación fue que sus longitudes de registro contaran con, al menos, 30 años de datos, y que abarcaran en conjunto la mayor extensión posible del país. En cuanto a la elección de estaciones hidrométricas para la revisión del flujo superficial, el criterio fue más riguroso debido a que esta variable es mucho más sensible a la influencia antropogénica y los elementos de sus series de tiempo son susceptibles a perder homogeneidad y aleatoriedad por cambios en el uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca aforada o por la instalación de controles, como obras de almacenamientos, captación o descarga, etc. Por lo tanto, fueron escogidas estaciones hidrométricas cuyo registro cumpliera con los siguientes criterios:

- la extensión del registro es de, al menos, 30 años;
- la cantidad de datos faltantes y discordantes no alcanza al 10% de la muestra;
- la serie de tiempo es homogénea; y
- la serie de tiempo es independiente.

La detección de valores discordantes se realizó mediante una transformación logarítmica de las series de tiempo para “normalizar” el conjunto de datos. Los valores ( $x$ ) que quedan fuera del rango de la Ecuación 4.1 (Montgomery y Runger, 2003) fueron considerados discordantes. En esta expresión,  $Q_1$  es el primer cuartil —ó 25° percentil—, y  $Q_3$  es el tercer cuartil —ó 75° percentil—.

$$Q_1 - 3(Q_3 - Q_1) \leq x \leq Q_3 + 3(Q_3 - Q_1) \quad (4.1)$$

Por otro lado, no existe una convención formal referente al máximo número de valores faltantes para el cálculo de normales climatológicas (Baddour y Kontongomde, 2007). Sin

embargo, en este estudio se estableció un diez por ciento como máximo para asegurar que los resultados de los índices fueran representativos del régimen hidrológico de cada sitio.

La homogeneidad de las series de tiempo fue evaluada con tres pruebas estadísticas, a saber: la prueba de la proporción de von Neumann (von Neumann, 1941), la prueba bayesiana (Chernoff y Zacks, 1964) y la prueba de desviaciones acumuladas (Buishand, 1982). Si al menos dos de las pruebas aplicadas indicaban la no homogeneidad de la serie de tiempo, ésta fue removida del análisis. Además, para evaluar la independencia (aleatoriedad) de la serie de tiempo, se aplicó la técnica de autocorrelación (Machiwal y Jha, 2012).

El conjunto final de sitios de aforo que formó parte de la evaluación de los productos de AD consistió en cinco estaciones hidrométricas y cinco estaciones climatológicas. Los Cuadros 4.1 y 4.2 sintetizan las principales características de estos sitios, cuya localización se muestra en la Figura 4.1.

Los coeficientes de ajuste analizados fueron el coeficiente de determinación ( $r^2$ ), la eficiencia de Nash-Sutcliffe ( $E$ ) y el índice de concordancia ( $d$ ). El coeficiente de determinación estima la dispersión combinada de las series de tiempo observada y estimada contra la dispersión simple de cada una de ellas y se calcula con la Ecuación 4.2.

$$r^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) (M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}} \right)^2 \quad (4.2)$$

donde  $O$  y  $M$  son los valores observados y estimados, respectivamente. El rango de  $r^2$  se encuentra entre 0 y 1, cuyo valor describe en qué grado la predicción logra reproducir a la dispersión observada. Un valor de cero significa que no existe correlación en absoluto, mientras que el valor de 1 significa que la dispersión de la estimación es igual a la de los valores observados. Típicamente, valores superiores a 0.5 se consideran aceptables (Moriasi *et al.*, 2007).

Por su parte, la eficiencia de Nash-Sutcliffe ( $E$ ) es 1 menos la suma del cuadrado de las diferencias absolutas entre los valores estimados y los observados, normalizada por la varianza de los valores observados durante el periodo analizado. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (4.3)$$

donde  $O$  y  $M$  son los valores observados y estimados, respectivamente. El rango de  $E$  se encuentra entre 1 (ajuste perfecto) y  $-\infty$ . Valores entre 0 y 1 son generalmente vistos como niveles aceptables de desempeño del modelo, mientras que una eficiencia igual o inferior a

Cuadro 4.1: Estaciones climatológicas usadas para evaluar la variable de precipitación de los productos de asimilación de datos.

| Clave   | Nombre       | Región hidrológica | Cuenca             | Localización |           |         |
|---------|--------------|--------------------|--------------------|--------------|-----------|---------|
|         |              |                    |                    | Lat [°]      | Lon [°]   | Alt [m] |
| C-01004 | Cañada Honda | Lerma-Santiago     | Río Verde Grande   | 22.0008      | -102.1989 | 1 925   |
| C-02033 | Mexicali     | Río Colorado       | Bacanora-Mejorada  | 32.6633      | -115.4678 | 3       |
| C-06003 | Callejones   | Armería-Coahuayana | Río Coahuayana     | 18.8156      | -103.6342 | 30      |
| C-07168 | Tonalá       | Costa de Chiapas   | Mar Muerto         | 16.0842      | -93.7439  | 55      |
| C-30068 | Los Ídolos   | Papaloapan         | Río Jamapa y otros | 19.4083      | -96.5164  | 100     |

Cuadro 4.2: Estaciones hidrométricas usadas para evaluar la variable de escurrimiento de los productos de asimilación de datos.

| Clave   | Nombre            | Región hidrológica | Corriente     | Área [km <sup>2</sup> ] | Localización |           |
|---------|-------------------|--------------------|---------------|-------------------------|--------------|-----------|
|         |                   |                    |               |                         | Lat [°]      | Lon [°]   |
| H-09067 | San Bernardo      | Sonora Sur         | Río Mayo      | 7 585.4                 | 27.4124      | -108.8833 |
| H-12428 | Bolaños           | Lerma-Santiago     | Río Bolaños   | 11 833.5                | 21.8278      | -103.7851 |
| H-24301 | Tepehuaje         | Bravo-Conchos      | Río San Juan  | 3 453.8                 | 25.4961      | -99.7675  |
| H-29006 | Jesús Carranza II | Coatzacoalcos      | Río Jaltepec  | 3 016.9                 | 17.3915      | -95.0529  |
| H-36039 | La Flor           | Nazas-Aguanaval    | Río Aguanaval | 18 675.2                | 25.0923      | -103.3248 |



Figura 4.1: Localización de las estaciones climatológicas (círculos etiquetados con “C”) e hidrométricas (triángulos etiquetados con “H”) usadas para la evaluación de los productos de asimilación de datos.

cero indica que el valor medio de la serie de tiempo observada resultaría un mejor predictor que el modelo empleado, lo que indica un desempeño inaceptable (Moriasi *et al.*, 2007).

Finalmente, el índice de concordancia ( $d$ ) representa la proporción entre el error medio cuadrado y el “error potencial”. Este último está definido como la suma del cuadrado de los valores absolutos de las distancias entre cada valor estimado y la media de los valores observados más las distancias entre cada valor observado y la media de los valores observados (Willmott, 1981). Una ventaja de este indicador de ajuste sobre los otros dos empleados es su sensibilidad ante las diferencias entre la media y varianza de los valores observados y estimados. Se define con la Ecuación 4.4.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|M_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (4.4)$$

donde  $O$  y  $M$  son los valores observados y estimados, respectivamente. El rango de  $d$  es similar al del  $r^2$  y va desde 0 (sin correlación) hasta 1 (ajuste perfecto).

Las siguientes subsecciones contienen los resultados de esta revisión. Resulta importante subrayar que la evaluación realizada en este estudio tiene como objetivo ofrecer una noción de la calidad de las fuentes de información empleadas. No se pretende realizar un análisis exhaustivo del tema debido al limitado programa de trabajo de esta investigación. No obstante, futuras líneas de estudio deberán incluir la evaluación de la calidad de las series de tiempo de los conjuntos de datos usados incorporando todas las estaciones de aforo que cumplan, a su vez, con el grado de calidad adecuado.

#### 4.1.1. Precipitación

Las Figuras 4.2 a 4.12 muestran los resultados de la evaluación de los productos de AD para la variable de precipitación.

El sitio donde se reproduce mejor la magnitud de la precipitación fue la estación Tonalá (07168), seguido por la estación Callejones (06003). Ambos con el producto MERRA-2 (Figuras 4.6a y 4.8a).

En contraste, el sitio con métricas de ajuste más pobres fue la estación Mexicali (02003) (Figura 4.4), en donde los valores derivados de los tres productos evaluados presentaron dispersiones y eficiencias por debajo de los niveles aceptables. Al ser éste el único sitio analizado en clima seco, podría suponerse que los resultados están relacionados con la escasa precipitación que comúnmente se observa en la región (alrededor de diez días con

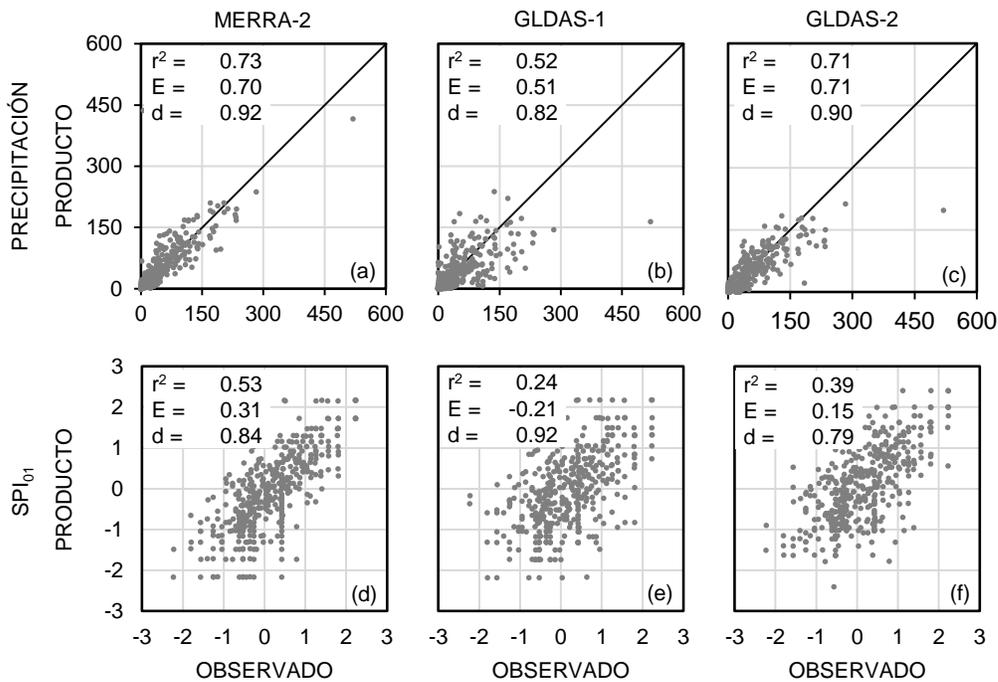


Figura 4.2: Gráficas de dispersión de la precipitación acumulada mensual, en mm (a, b, c) y  $SPI_{01}$  (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación Cañada Honda (01004).

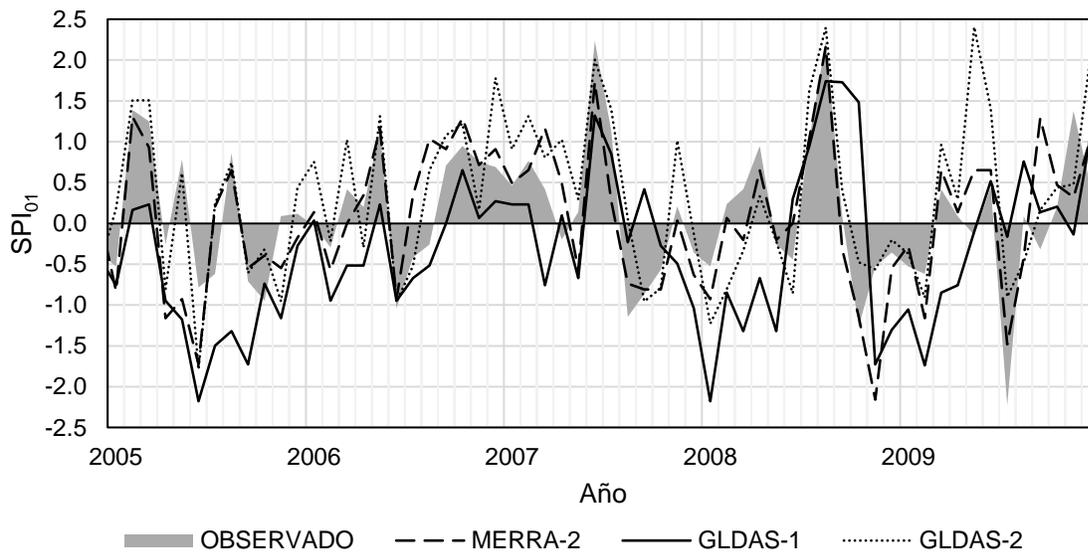


Figura 4.3: Fragmento de las series de tiempo del  $SPI_{01}$  calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación Cañada Honda (01004).

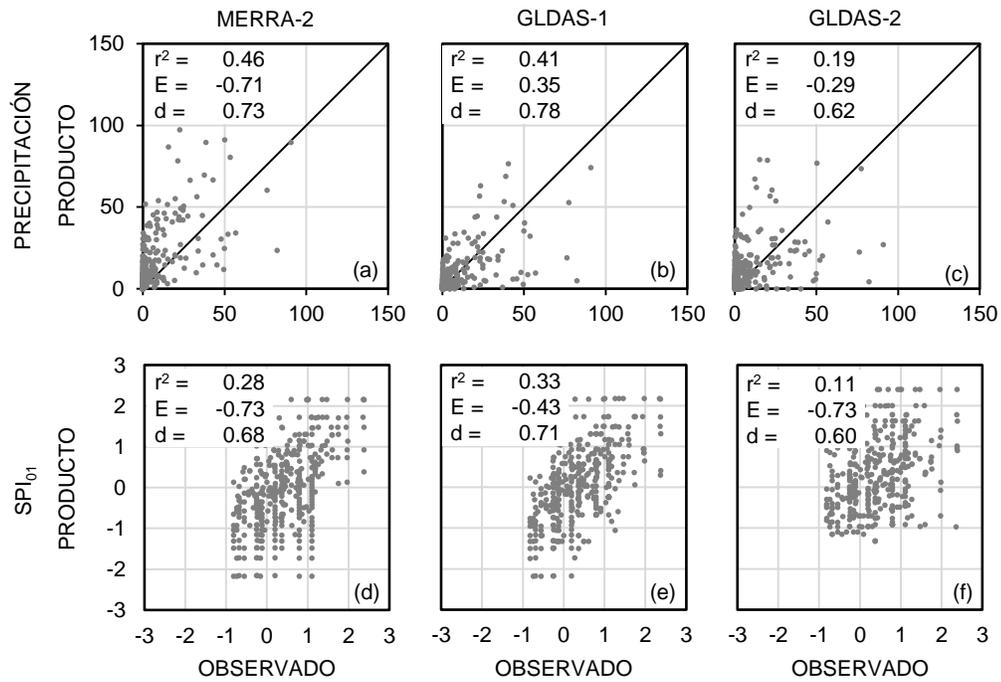


Figura 4.4: Gráficas de dispersión de la precipitación acumulada mensual, en mm (a, b, c) y SPI<sub>01</sub> (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación Mexicali (02033).

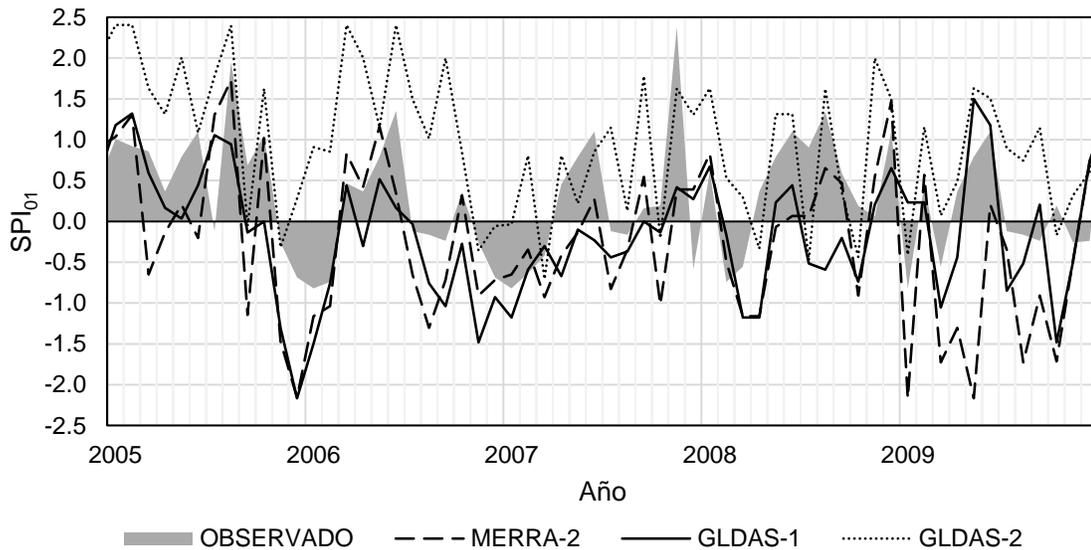


Figura 4.5: Fragmento de las series de tiempo del SPI<sub>01</sub> calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación Mexicali (02033).

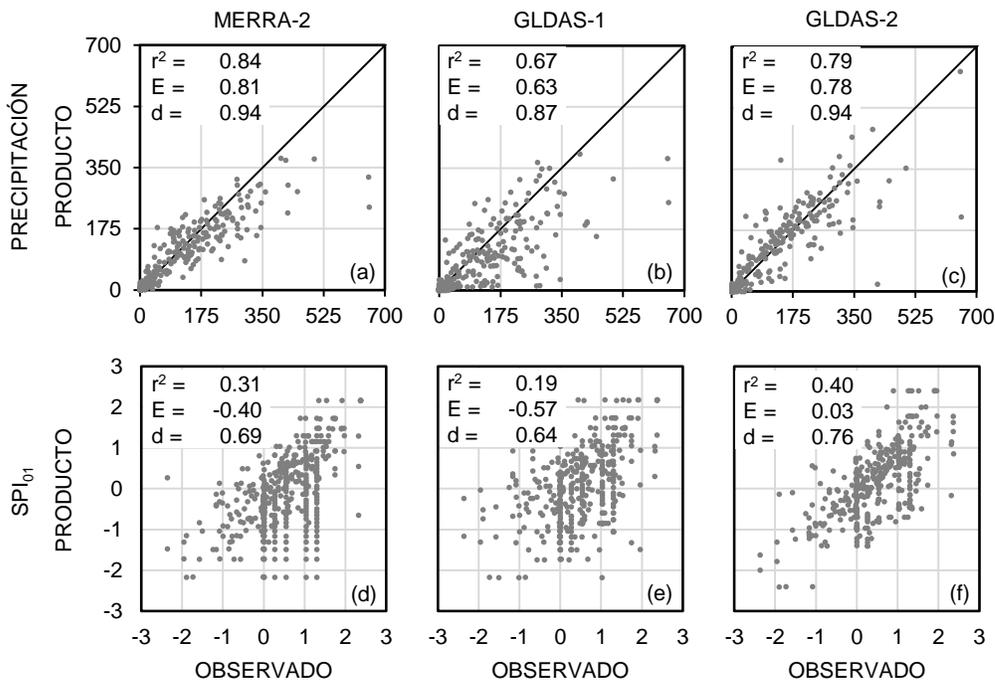


Figura 4.6: Gráficas de dispersión de la precipitación acumulada mensual, en mm (a, b, c) y  $SPI_{01}$  (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación Callejones (06003).

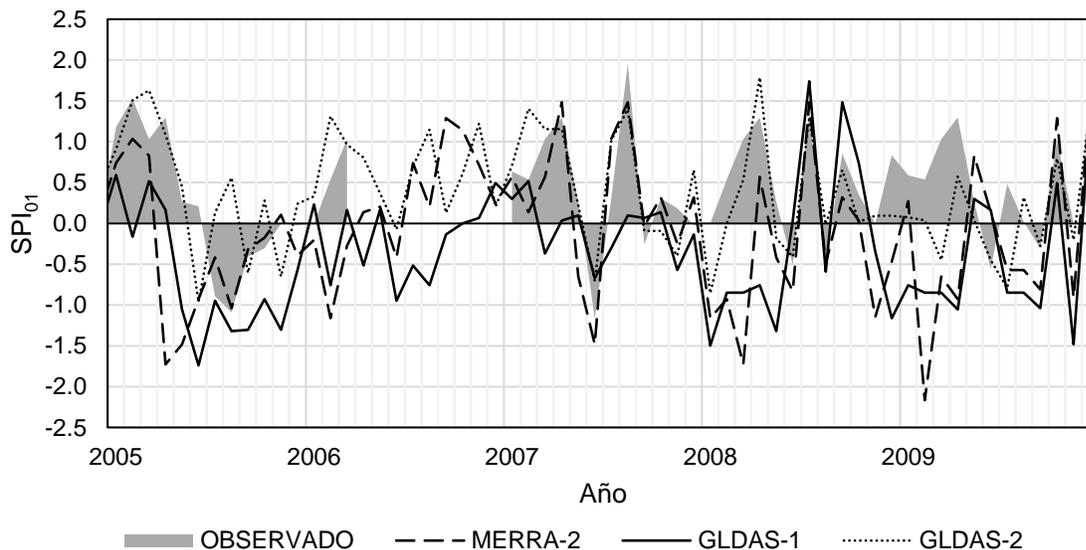


Figura 4.7: Fragmento de las series de tiempo del  $SPI_{01}$  calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación Callejones (06003).

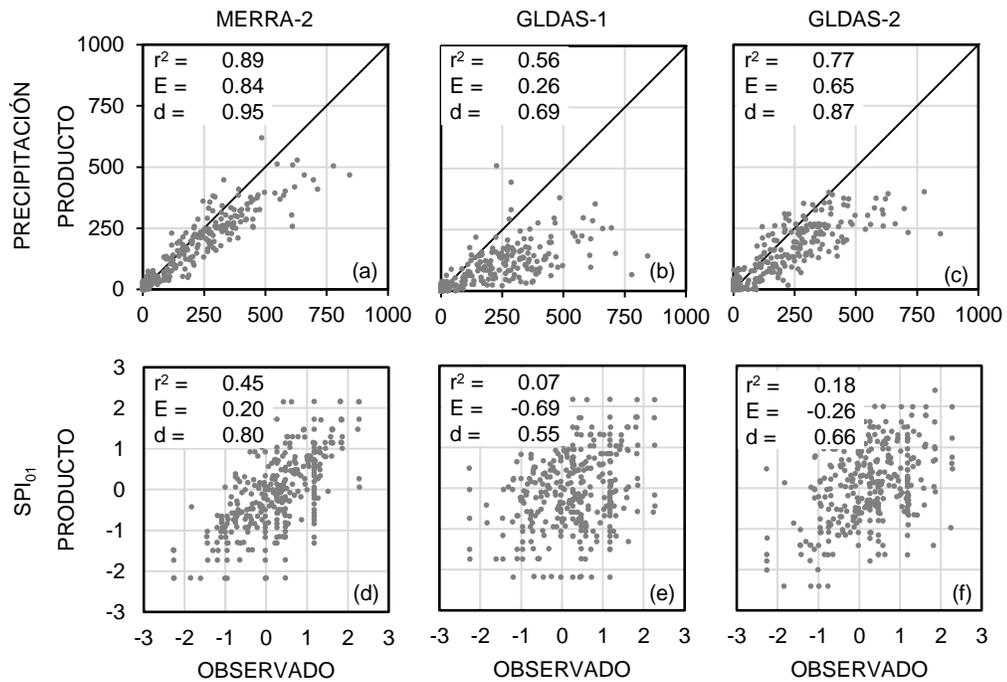


Figura 4.8: Gráficas de dispersión de la precipitación acumulada mensual, en mm (a, b, c) y  $SPI_{01}$  (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación Tonalá (07168).

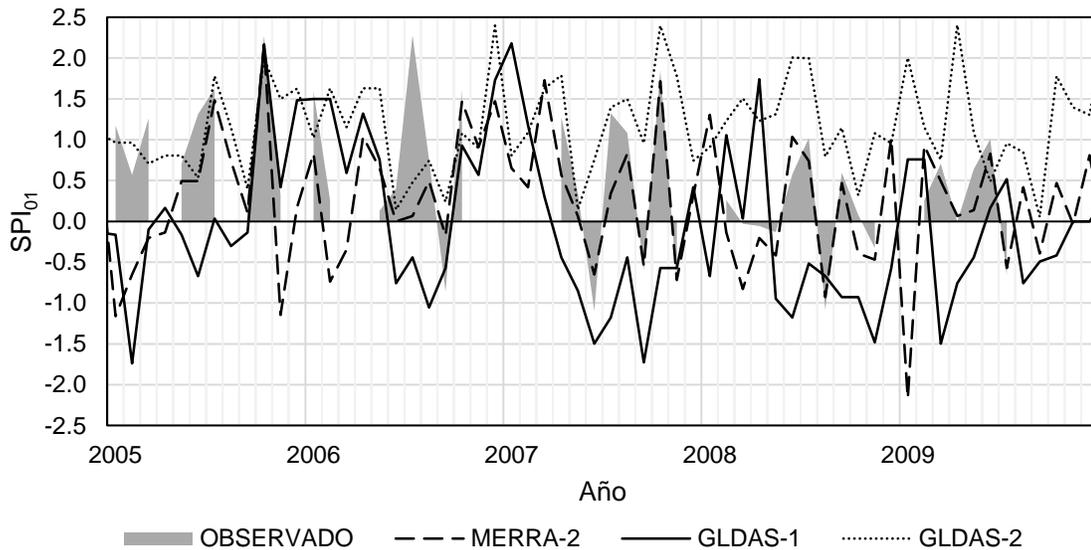


Figura 4.9: Fragmento de las series de tiempo del  $SPI_{01}$  calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación Tonalá (07168).

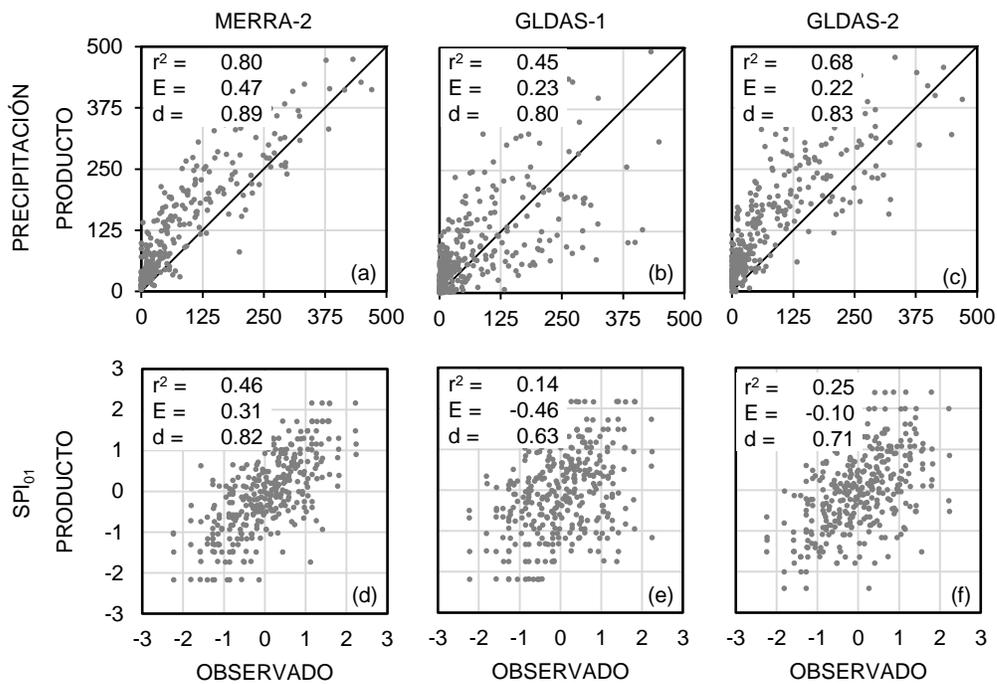


Figura 4.10: Gráficas de dispersión de la precipitación acumulada mensual, en mm (a, b, c), y SPI<sub>01</sub> (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación Los Ídolos (30068).

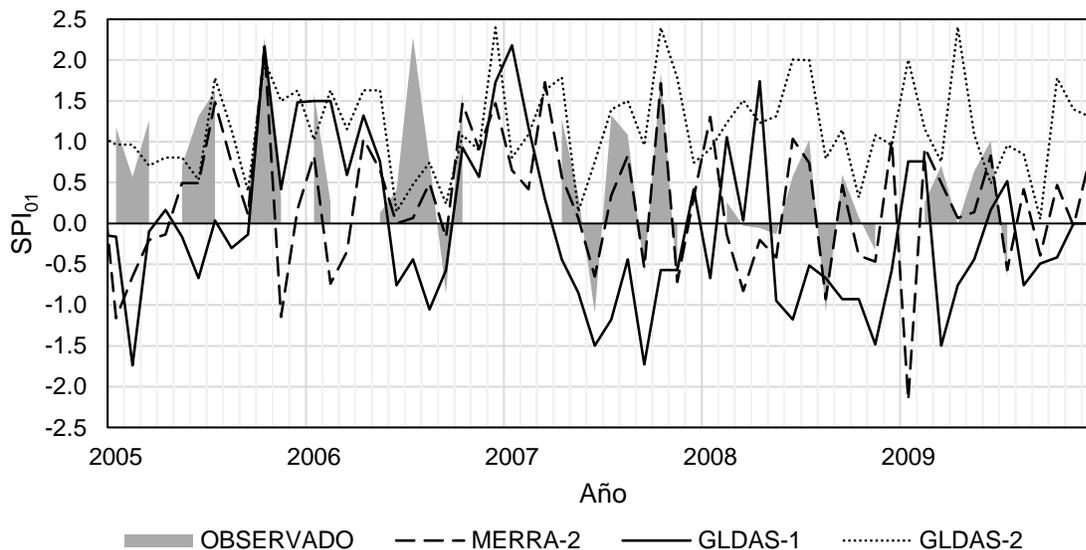


Figura 4.11: Fragmento de las series de tiempo del SPI<sub>01</sub> calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación Los Ídolos (30068).

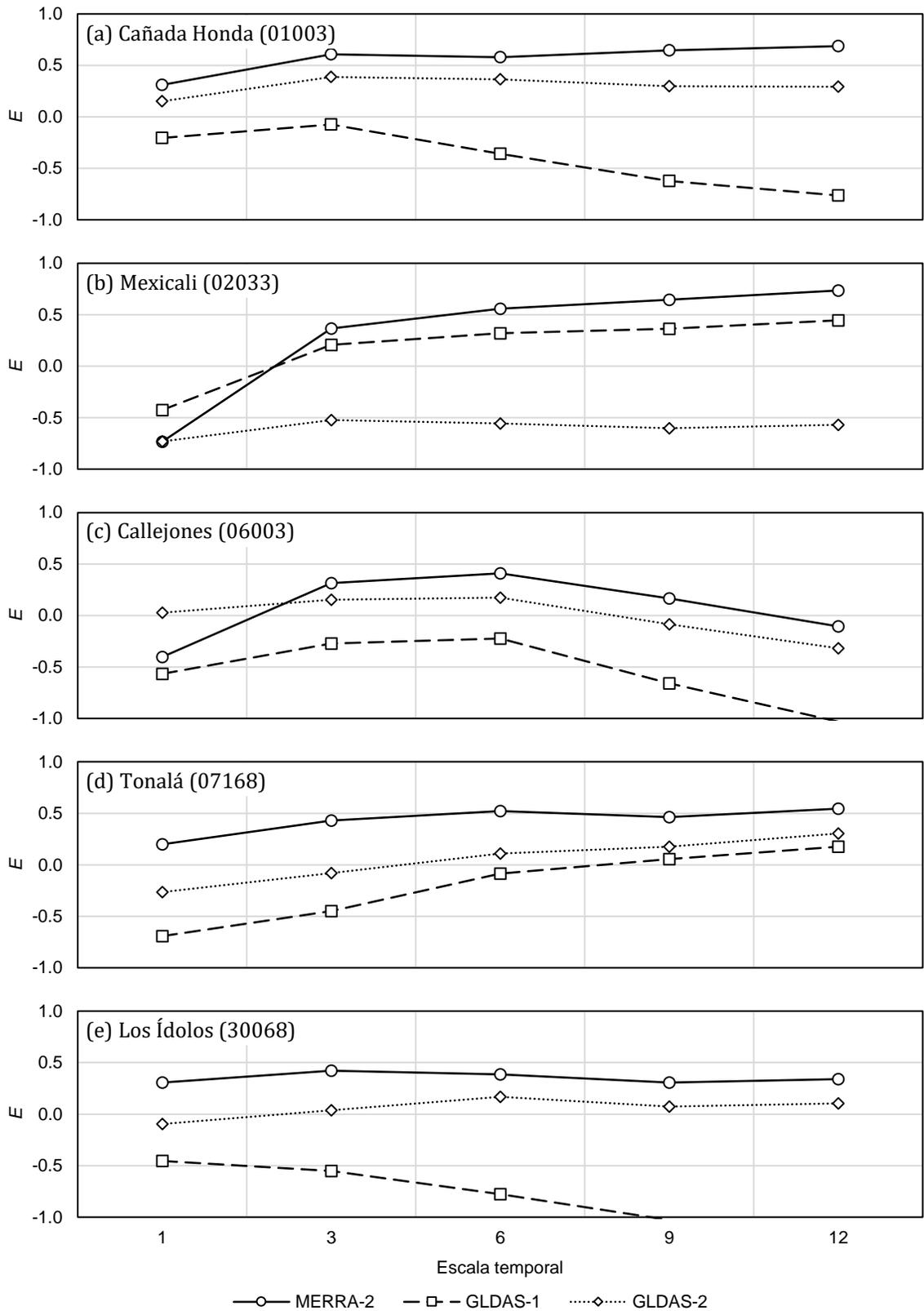


Figura 4.12: Variación de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) del SPI de los distintos productos de asimilación de datos y estaciones climatológicas en función de la escala temporal de análisis.

lluvia perceptible y menos de 50 mm de lluvia acumulada al año), lo que se refleja en series de tiempo con un predominio de valores nulos. Es necesario llevar a cabo un análisis a detalle y con más estaciones en clima seco para determinar el motivo del bajo rendimiento de los productos en este sitio.

Por otra parte, la variabilidad de la lluvia en los sitios analizados, evaluada mediante el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI; Farahmand y AghaKouchak, 2015; McKee, Doesken y Kleist, 1993), presentó un menor desempeño. La estación en la que se encontró un mejor ajuste de los productos de AD fue Cañada Honda (01004), seguida de Los Ídolos (30068), nuevamente con los resultados del producto MERRA-2 (Figuras 4.2d y 4.10d). En la estación Mexicali (02033) se observaron métricas de ajuste pobres también para este indicador. No obstante, al ampliar la escala temporal de análisis, los resultados de los productos MERRA-2 y GLDAS-1 mejoran significativamente (ver la Figura 4.12b). Este efecto sugiere que, a pesar de no capturar las fluctuaciones de corto plazo (un mes) en este sitio, las variables de precipitación de estos productos son capaces de representar la fluctuación a mediano plazo (a partir de tres meses acumulados) en el sitio de esta estación climatológica.

En términos generales, en función de los resultados de la evaluación de los cinco sitios, puede establecerse que los productos de AD son capaces de representar de manera aceptable la magnitud y variabilidad de la precipitación, con ciertas limitaciones. MERRA-2 se impuso sobre el resto de los productos, mientras que GLDAS-1 ofreció el desempeño más pobre. Además, el análisis de bondad de ajuste para las distintas escalas temporales mostró que el SPI derivado de los productos se ajusta mejor a los valores observados conforme incrementa la ventana de tiempo con que se calcula el índice.

#### 4.1.2. Escurrimiento

Las Figuras 4.13 a 4.23 muestran los resultados de la evaluación de los productos de AD para la variable de escurrimiento. En términos generales, el ajuste de la variable de escurrimiento con respecto a las observaciones fue inferior al ajuste encontrado en la variable de precipitación. Este resultado se esperaba, dado que los valores de la variable de escurrimiento son resultados de los distintos modelos numéricos que aplica cada producto, en contraste con la variable de precipitación, que se trata de mediciones realizadas mediante percepción remota.

El sitio donde se reproduce mejor la magnitud del escurrimiento fue la estación San Bernardo (09067), seguido por la estación Tepehuaje (24301). Ambos con el producto MERRA-2

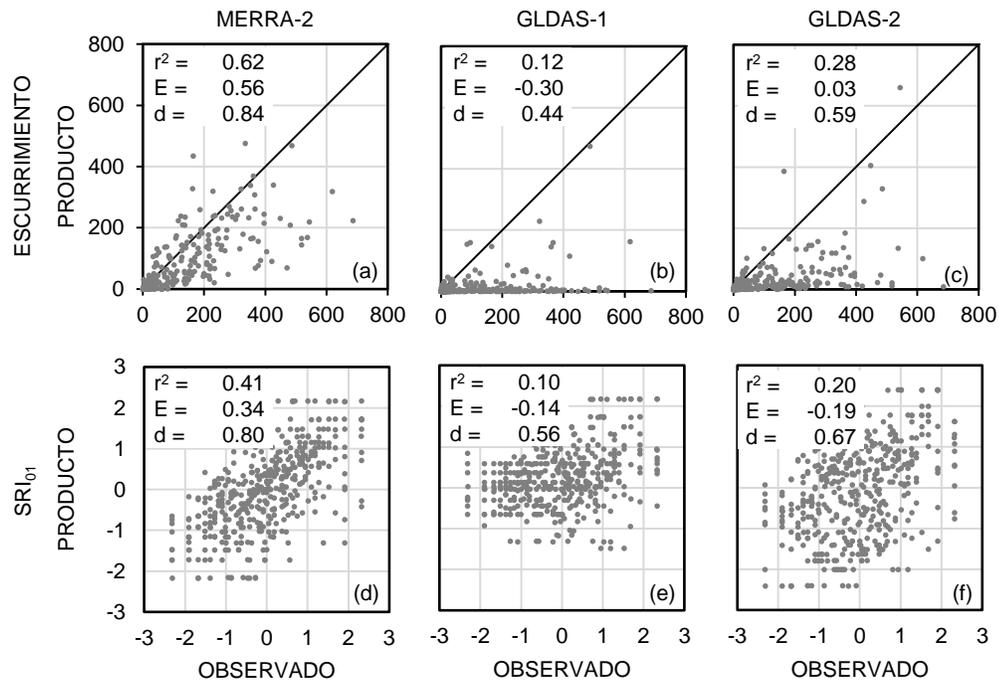


Figura 4.13: Gráficas de dispersión del escurrimiento acumulado mensual, en  $\text{hm}^3$  (a, b, c), y  $\text{SRI}_{01}$  (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación San Bernardo (09067).

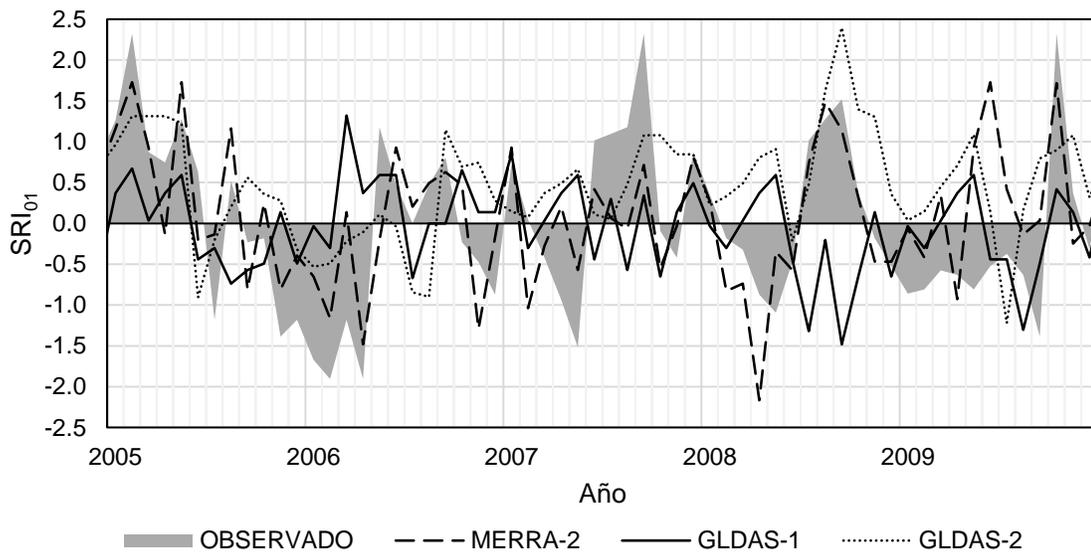


Figura 4.14: Fragmento de las series de tiempo del  $\text{SRI}_{01}$  calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación San Bernardo (09067).

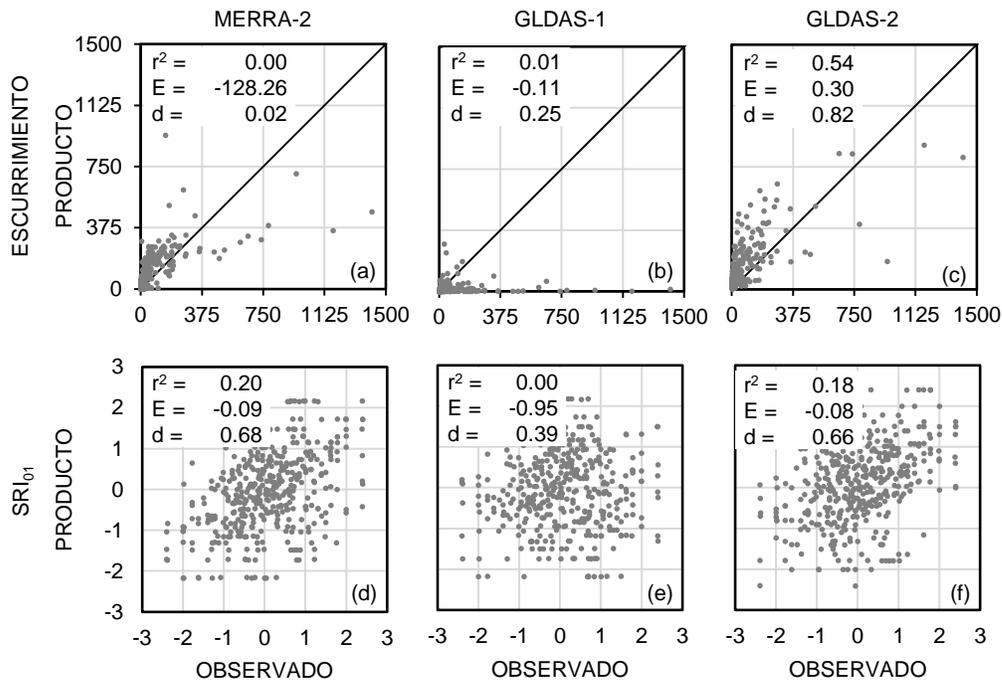


Figura 4.15: Gráficas de dispersión del escurrimiento acumulado mensual, en  $\text{hm}^3$  (a, b, c), y  $\text{SRI}_{01}$  (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación Bolaños (12428).

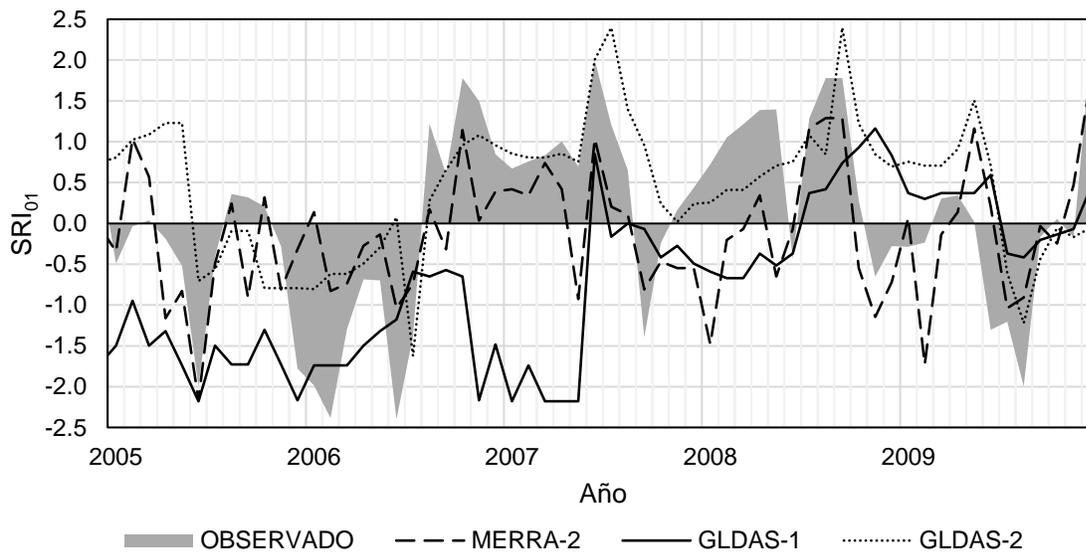


Figura 4.16: Fragmento de las series de tiempo del  $\text{SRI}_{01}$  calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación Bolaños (12428).

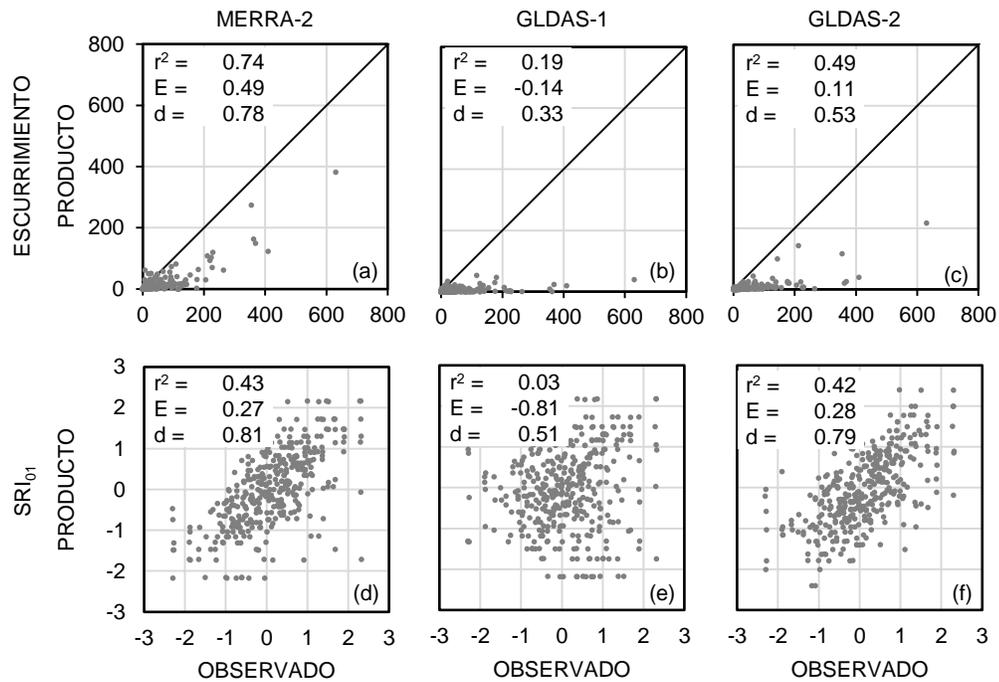


Figura 4.17: Gráficas de dispersión del escurrimiento acumulado mensual, en  $\text{hm}^3$  (a, b, c), y  $\text{SRI}_{01}$  (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación Tepehuaje (24301).

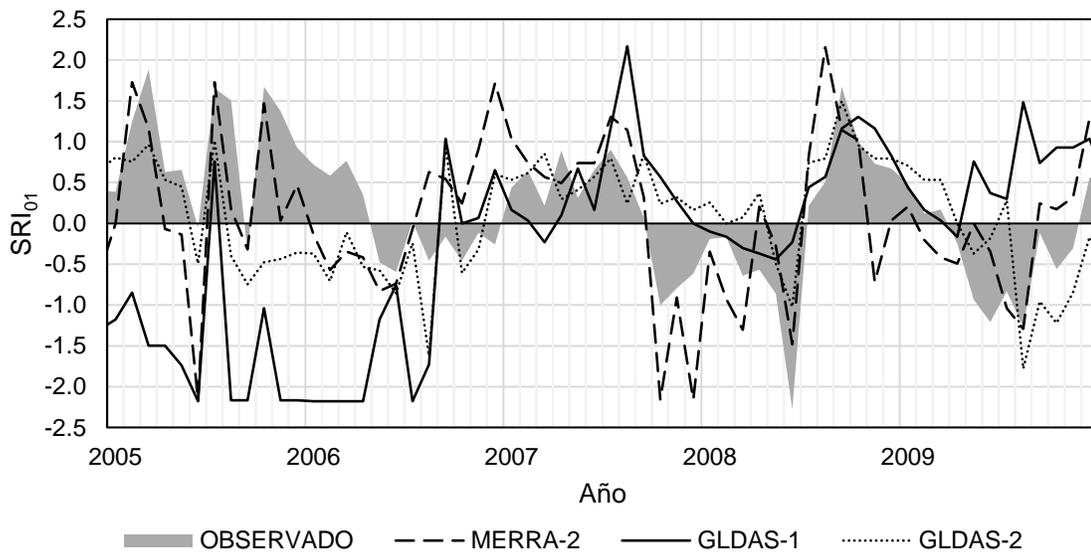


Figura 4.18: Fragmento de las series de tiempo del  $\text{SRI}_{01}$  calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación Tepehuaje (24301).

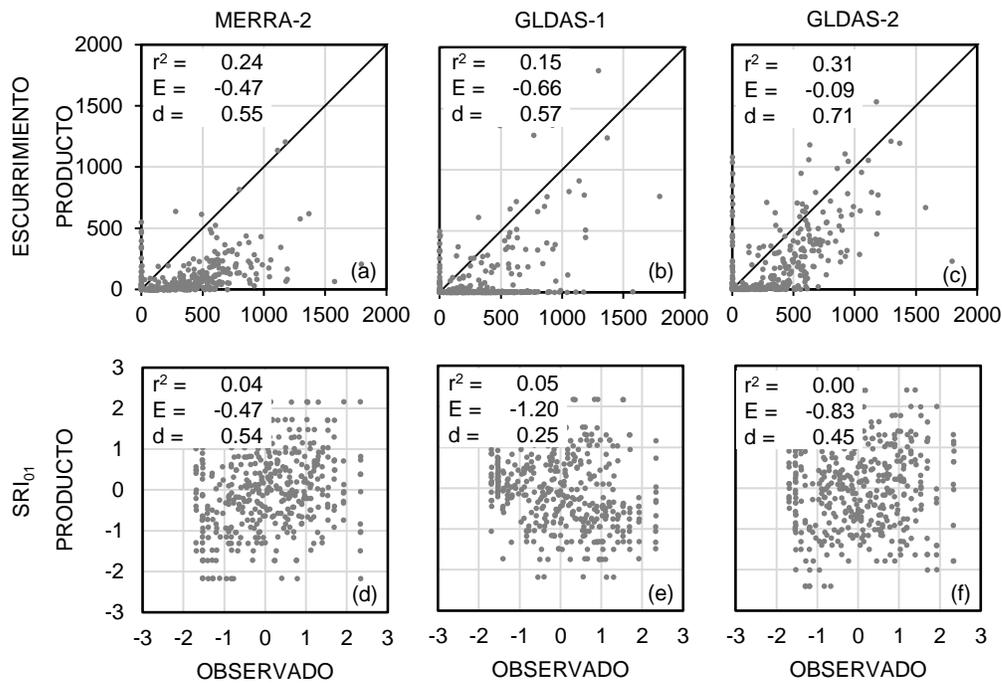


Figura 4.19: Gráficas de dispersión del escurrimiento acumulado mensual, en  $\text{hm}^3$  (a, b, c), y  $\text{SRI}_{01}$  (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación Jesús Carranza II (29006).

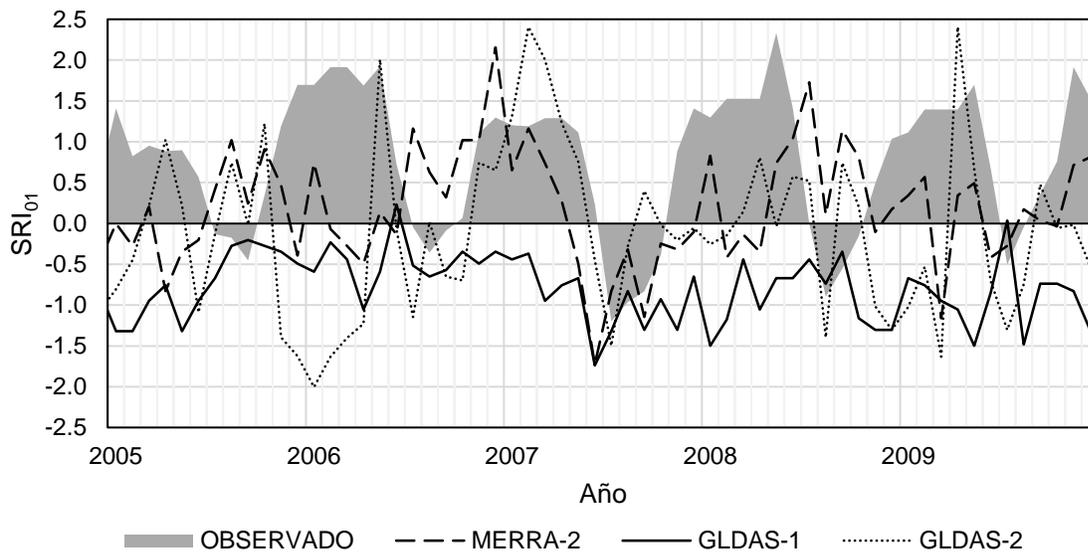


Figura 4.20: Fragmento de las series de tiempo del  $\text{SRI}_{01}$  calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación Jesús Carranza II (29006).

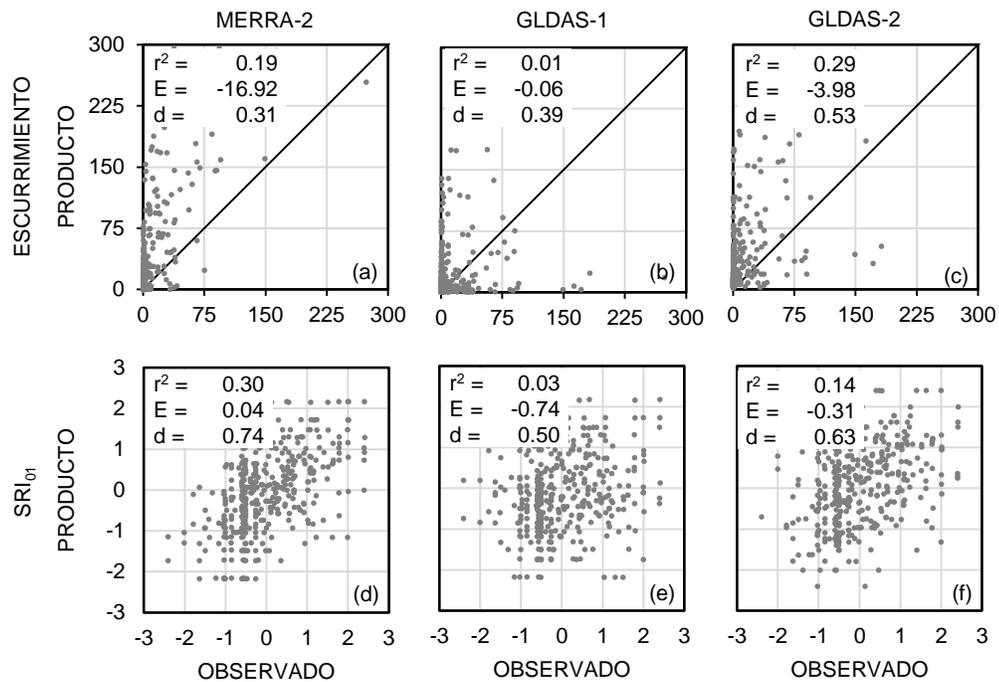


Figura 4.21: Gráficas de dispersión del escurrimiento acumulado mensual, en  $\text{hm}^3$  (a, b, c), y  $\text{SRI}_{01}$  (d, e, f) derivados de productos de asimilación de datos y observaciones de la estación La Flor (36039).

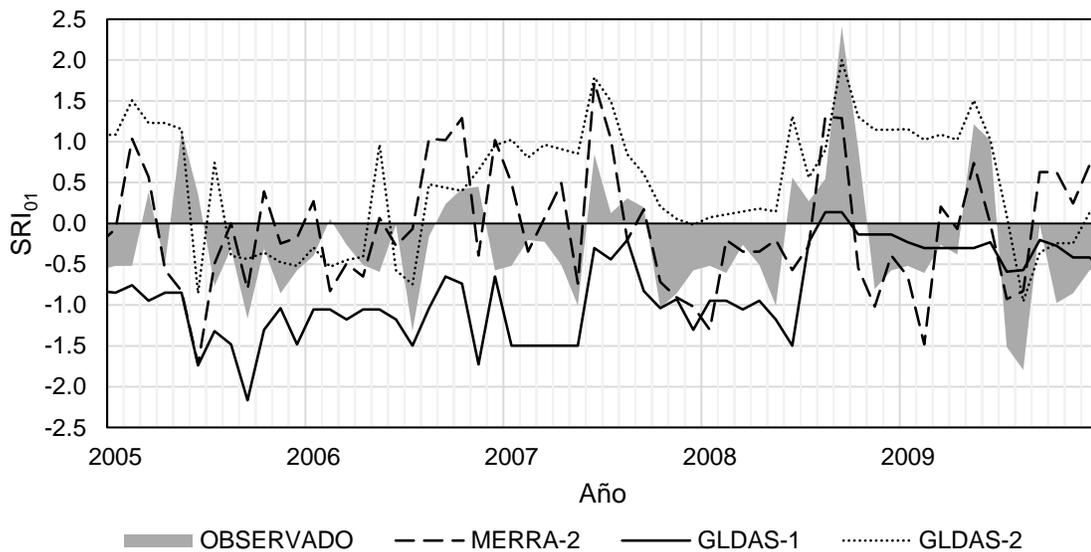


Figura 4.22: Fragmento de las series de tiempo del  $\text{SRI}_{01}$  calculado con las distintas fuentes de información correspondiente al periodo 2005-2010 en la estación La Flor (36039).

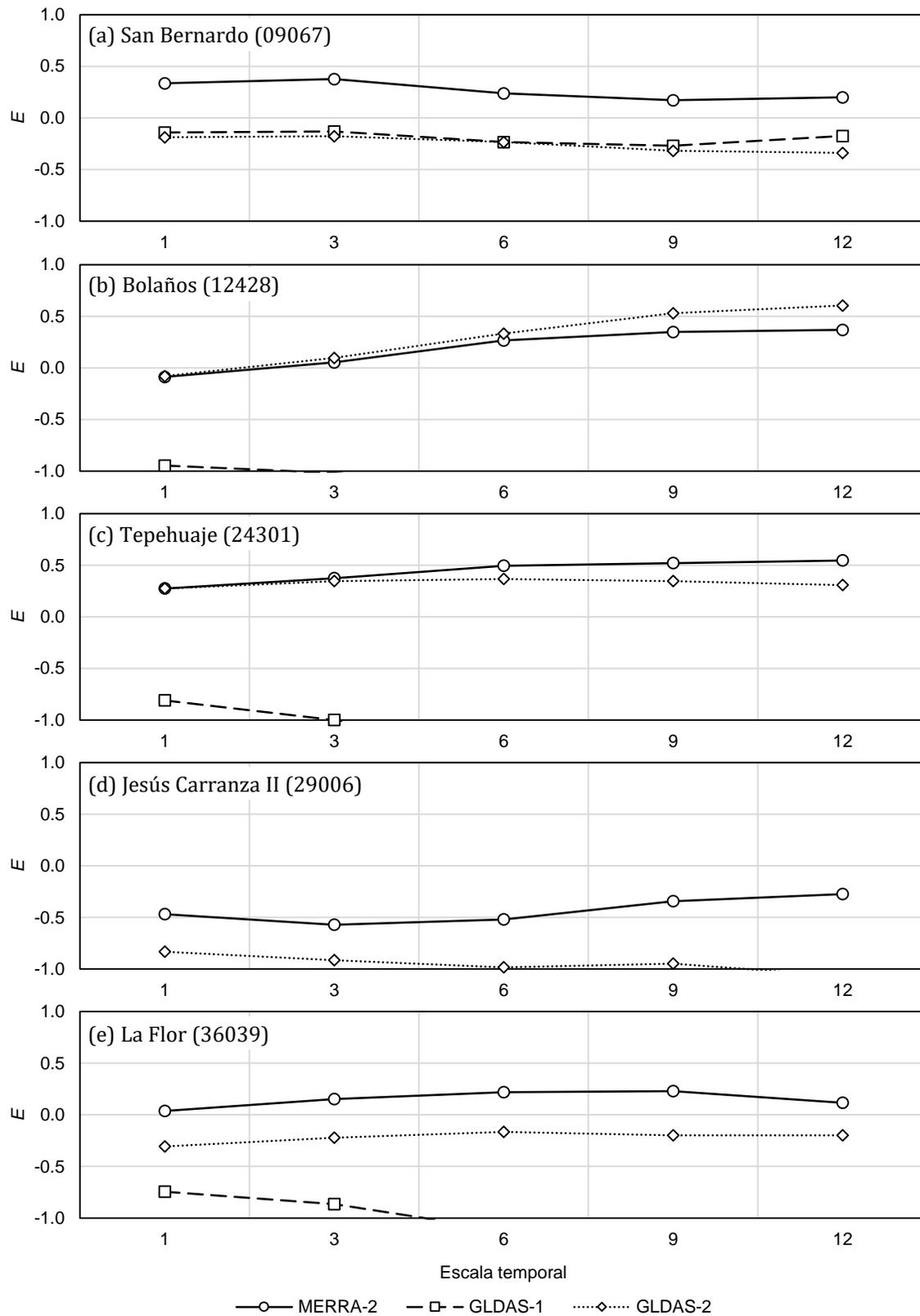


Figura 4.23: Variación de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) del SRI de los distintos productos de asimilación de datos y estaciones hidrométricas en función de la escala temporal de análisis.

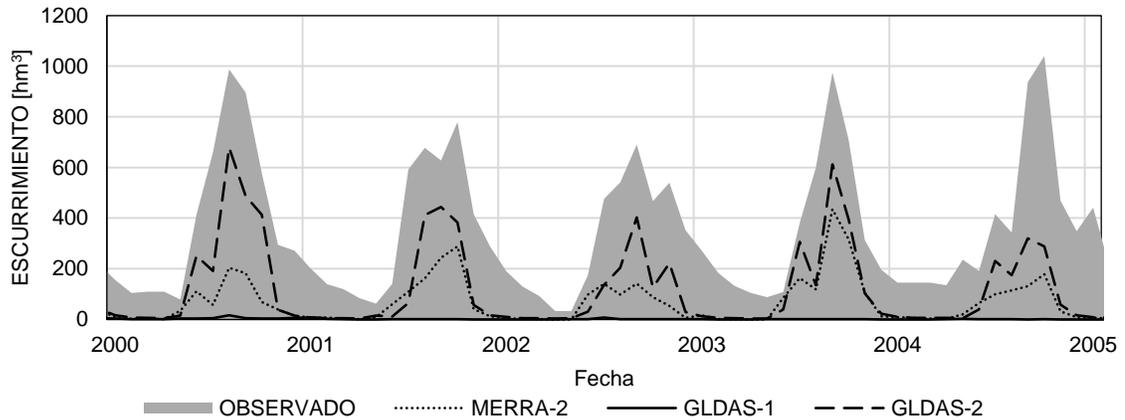


Figura 4.24: Gasto observado en la estación Jesús Carranza II (29006) y gastos derivados de los productos de asimilación de datos en el periodo 2000-2005.

(Figuras 4.13a y 4.17a).

Por otro lado, los sitios con métricas de ajuste más pobres fueron la estación Jesús Carranza II (29006) (Figura 4.19) y La Flor (39039) (Figura 4.21), en donde los valores derivados de los productos de AD presentaron dispersiones y eficiencias con respecto a los valores observados por debajo de los niveles aceptables. En el caso de la estación Jesús Carranza II, se observó que su flujo tiene una importante componente subsuperficial reflejada en la presencia de gasto base durante todo el año (ver la Figura 4.24). Es posible que los modelos de superficie terrestre de los productos de AD no hayan sido capaces de simular este flujo, por lo que subestiman sistemáticamente el escurrimiento. Es necesario llevar a cabo una revisión exhaustiva de la precisión de las fuentes de información para determinar la razón de este comportamiento y si realmente se trata de una deficiencia de la información de los productos de AD o de las observaciones *in situ*.

En lo tocante a la estación La Flor, ésta se encuentra en una región de clima seco. Ya se observó en la subsección anterior que la precipitación no fue correctamente representada en otra región con este mismo tipo de clima (Río Colorado), lo que podría estar reflejando también en la sobreestimación del escurrimiento. Esto contrasta con los resultados de la estación San Bernardo que también se encuentra en una región de clima seco (Sonora Sur), por lo que resulta necesario llevar a cabo un análisis a detalle que considere los rasgos morfológicos e hidrológicos de las cuencas de aportación para determinar el motivo del bajo rendimiento de los productos en estos sitios.

La variabilidad del escurrimiento en los sitios analizados, evaluada mediante el Índice Estandarizado de Escurrimiento (SRI; Farahmand y AghaKouchak, 2015; Shukla y A. W. Wood,

2008), presentó un menor desempeño, con una excepción en la cuenca de la estación La Flor (36039). En este caso, a pesar de que el valor absoluto es sobreestimado por los productos de AD, su variabilidad está por encima del umbral considerado aceptable. Este resultado es un ejemplo que muestra la importancia que los índices de estandarizados de sequía otorgan a la variabilidad de los indicadores, sobre su valor absoluto.

La estación en la que se encontró un mejor ajuste de los productos de AD fue San Bernardo (09067), también con el producto MERRA-2 (Figura 4.13d). En el otro extremo se encuentra la estación Jesús Carranza II (29006), en la que se observaron métricas de ajuste pobres también para este indicador.

Se observó una tendencia al alza en el desempeño de los productos conforme las ventanas de tiempo son mayores (ver la Figura 4.23). No obstante, otra vez destacó el pobre ajuste en la cuenca de la estación Jesús Carranza II, donde ningún producto, con ninguna escala temporal de análisis, fue capaz de representar el escurrimiento y su variabilidad.

En términos generales, en función de los resultados de la evaluación de los cinco sitios, puede establecerse que el escurrimiento derivado del producto MERRA-2, y en algunos casos también GLDAS-2, son capaces de representar de manera aceptable la magnitud y variabilidad del escurrimiento. Además, el análisis de bondad de ajuste para las distintas escalas temporales mostró que el SRI derivado de los productos se ajusta mejor conforme incrementa la ventana de tiempo con que se calcula el índice.

El resultado más concluyente de esta evaluación es que las variables de precipitación y escurrimiento derivadas del producto GLDAS-1 son ineficientes para representar las condiciones hidrológicas de los diez sitios elegidos en el territorio nacional, mientras que MERRA-2 emerge como el de mejores métricas de desempeño dado que refleja, con ciertas limitaciones, la dispersión y magnitud de dichos indicadores, comparativamente con las observaciones *in situ*.

El producto GLDAS-2 demostró también un desempeño aceptable al reproducir la magnitud y fluctuación de las variables de precipitación y escurrimiento en los sitios evaluados. No obstante, la información disponible de este producto no ha sido actualizada desde junio de 2016 (cuatro meses de retraso, hasta la fecha redacción de este documento), por lo que se ha decidido no emplearlo para el monitoreo de sequías. Si en un futuro los conjuntos de datos de GLDAS-2 son actualizados periódicamente, se convertirán en una muy buena alternativa para la evaluación de los índices de sequía calculados en este estudio.

Los análisis que se mostrarán en la siguiente sección han sido realizados tomando como fuente de información a los datos derivados de MERRA-2.

## 4.2. Aplicación de los índices multivariados para monitoreo

En esta sección se presentarán algunos resultados obtenidos y se validará su uso operacional mediante ejemplos de eventos de sequía documentados.

### 4.2.1. Caso 1: Región hidrológica Nazas-Aguanaval 2010-2013

La más severa sequía en lo que va del siglo, y reconocida como la peor en 70 años, fue la sequía 2010-2011. El número de personas afectadas por este desastre ascendió a 2 500 000 (Guha-Sapir, Below y Hoyois, 2016). Durante su periodo crítico, en mayo de 2011, el 86 % del país presentó algún grado de sequía. Como resultado, fueron aprobadas declaratorias de emergencia por sequía en 1 174 municipios del país (Giner, Fierro y Negrete, 2012).

Los impactos materiales incluyeron la pérdida del 29 % de la producción nacional de frijol en 2.7 millones de hectáreas agrícolas siniestradas en Sinaloa, Zacatecas y Guanajuato. Además, durante este evento 12 millones de cabezas de ganado presentaron pérdida de peso y calidad de producción, y se reportó la muerte de 450 000 cabezas de ganado bovino (Caballero, 2012; Rodríguez Licea y Juárez Carrillo, 2011).

Este caso ha sido revisado mediante dos enfoques con la finalidad de contrastar los resultados de cada uno. Éstos han sido: (i) el enfoque tradicional que emplea las distintas escalas temporales del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) para reflejar los efectos del déficit de precipitación en el sistema hidrológico (WMO, 2012); y (ii) el enfoque multivariado mediante el Índice Estandarizado Multivariado de Sequía (MSDI) trivariado (precipitación, escurrimiento y humedad del suelo), desglosando los principales efectos en cada momento durante el periodo seco con ayuda de los índices estandarizados univariados con escala temporal de un mes de precipitación ( $SPI_{01}$ ), escurrimiento ( $SRI_{01}$ ) y humedad del suelo ( $SSI_{01}$ ).

La Figura 4.25 muestra la localización de la región hidrológica Nazas-Aguanaval, una de las regiones más afectada por el evento 2010-2011, según los reportes de impactos. A continuación, se hará una revisión de la evolución del periodo de sequía en esta región.

Han sido determinadas las escalas temporales de 1, 3, 6 y 12 meses del SPI promedio en esta región, mismas que se muestran en la Figura 4.26. De estas series temporales puede interpretarse un prolongado periodo de sequía meteorológica en octubre/2010-febrero/2012 (Figura 4.26a) con una intensidad máxima de  $SPI_{01} = -2.1$ . La respuesta de la humedad del suelo ante la falta de lluvia se infiere en una secuencia de valores negativos del  $SPI_{03}$



Figura 4.25: Localización de la región hidrológica Nazas Aguanaval.

(sequía agrícola) a partir de octubre/2010 que se prolonga hasta abril de 2012 (dos meses más extensa que la sequía meteorológica) (Figura 4.26b), con una intensidad máxima de  $SPI_{03} = -2.1$ . El déficit en el escurrimiento (sequía hidrológica) es interpretado con base en los valores negativos del  $SPI_{06}$  a partir de enero de 2011, pero éste persiste hasta septiembre de 2013 (Figura 4.26c) y presenta una intensidad máxima en junio/2011 con un valor de  $SPI_{06} = -2.2$ . Finalmente, la Figura 4.26d, correspondiente al  $SPI_{12}$ , refleja los efectos de la sequía en los niveles de almacenamientos superficiales y acuíferos de la región (sequía hidrológica e hidrogeológica), cuyos efectos inician lentamente a partir de marzo de 2011 y se prolongan hasta diciembre de 2013, con una intensidad máxima alcanzada en octubre/2011 con un valor de  $SPI_{12} = -2.0$ . Según el criterio adoptado en este estudio, una *sequía meteorológica excepcional* tuvo efectos en la humedad del suelo, escurrimiento y nivel de almacenamientos superficiales y subterráneos, provocando sequía en todos ellos con un grado *excepcional*.

Por otro lado, el enfoque multivariado aplicado en este estudio permite evaluar la sucesión de efectos descrita por las distintas escalas temporales del SPI a través de la información disponible de cada variable (*i. e.*, precipitación, escurrimiento y humedad del suelo). Para esto, la Figura 4.27 muestra las series de tiempo de los índices estandarizados de sequía promedio para la región hidrológica Nazas-Aguanaval, para una escala temporal de 1 mes.

La serie de tiempo del  $SPI_{01}$  (Figura 4.27a) presenta un prolongado periodo de déficit de precipitación (sequía meteorológica) de octubre/2010 a febrero/2012 que alcanza una intensidad máxima de  $SPI_{01} = -2.1$  en noviembre/2010 y otro de nueve meses de octubre/2012 a julio/2013, con una intensidad máxima de  $SPI_{01} = -1.5$  en abril/2013. Ambos eventos de sequía se ven reflejados en un déficit de escurrimiento (sequía hidrológica) detectado mediante la serie de tiempo del  $SRI_{01}$  (Figura 4.27b), que persiste hasta julio de 2013 y presenta su punto crítico en noviembre de 2010, con una intensidad de  $SRI_{01} = -2.0$ . El análisis del  $SSI_{01}$  (Figura 4.27c) permite identificar un periodo de déficit de humedad del

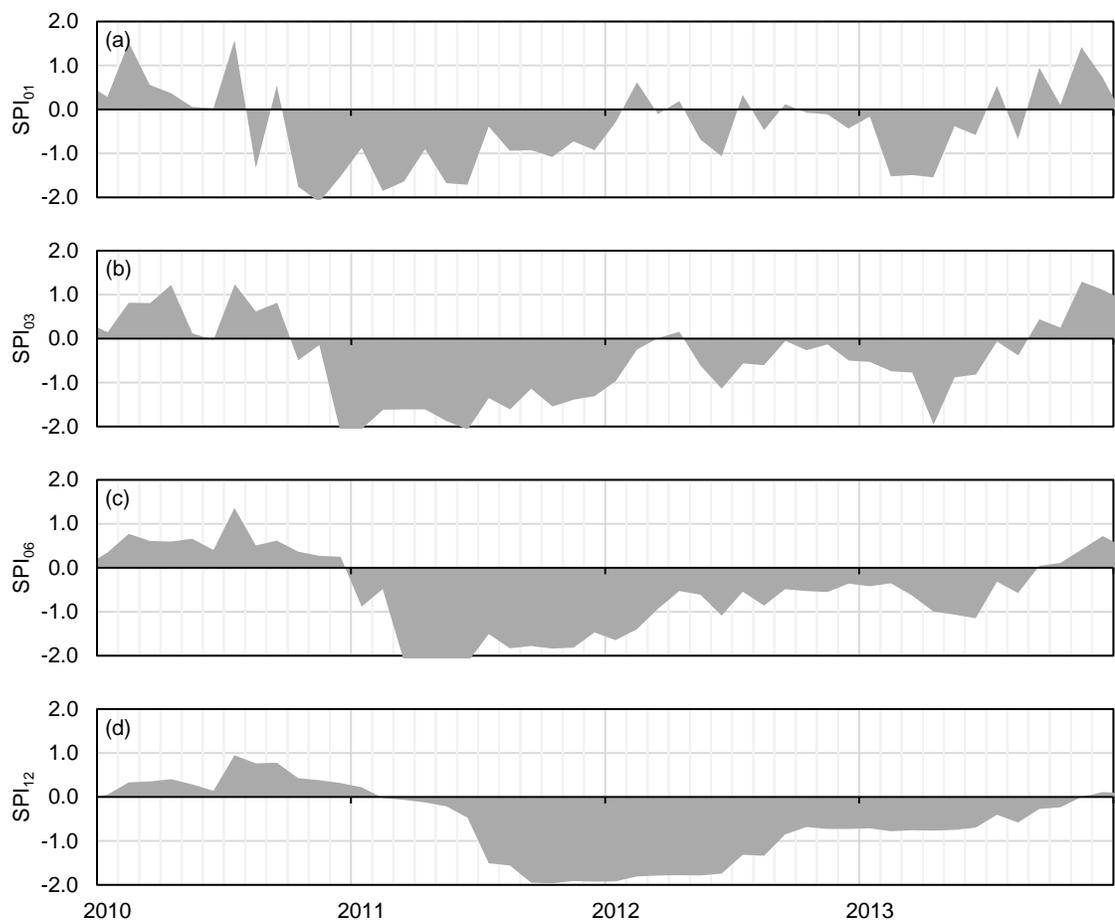


Figura 4.26: Series de tiempo del SPI para distintas escalas temporales para la región hidrológica Nazas-Aguanaval en el periodo 2010-2013.

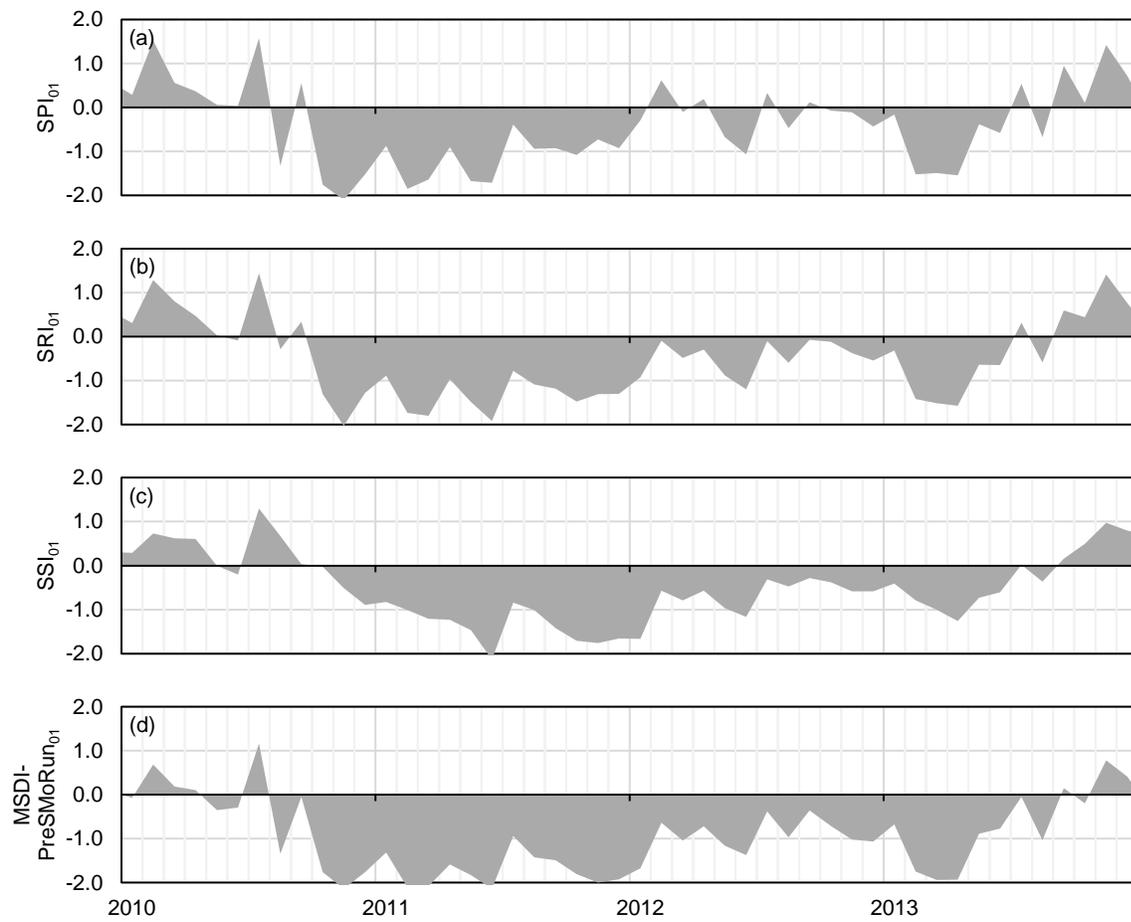


Figura 4.27: Series de tiempo de los índices estandarizados de sequía promedio en la región hidrológica Nazas-Aguanaval en el periodo 2010-2013.

suelo (sequía agrícola) entre noviembre/2010 y julio/2013, con su mayor intensidad durante el mes de junio/2011, con un valor de  $SSI_{01} = -2.1$ . Finalmente, la serie de tiempo del  $MSDI-PreSMoRun_{01}$  (Figura 4.27d) integra el déficit de las tres variables en un solo índice, e identifica un prolongado periodo seco con las siguientes características:

- La sequía inició en octubre de 2010 y terminó en septiembre de 2013.
- Duración de 35 meses (casi tres años continuos de sequía), de los cuales:
  - 4 meses presentaron *sequía excepcional* (D4);
  - 10 meses presentaron *sequía extrema* (D3);
  - 5 meses presentaron *sequía severa* (D2);
  - 8 meses presentaron *sequía moderada* (D1);
  - 5 meses fueron *anormalmente secos* (D0); y
  - 3 meses se encontraron dentro del rango *normal*, pero por debajo de la mediana de humedad.
- Intensidad máxima de sequía de  $MSDI-PreSMoRun_{01} = -2.1$ , alcanzada en noviembre/2010 y junio/2011.

Los resultados obtenidos con el uso de las escalas temporales del SPI y con el  $MSDI-PreSMoRun_{01}$  son similares. Ambos reflejan impactos de la sequía en las distintas etapas del proceso de propagación hasta 2013, lo que contrasta con el periodo comúnmente identificado para esta sequía (2010-2011).

Si bien el periodo total de sequía fue detectado de manera similar por los dos enfoques, el índice trivariado tiene la virtud de ser producto de la información específica de cada una de las variables involucradas. A pesar de que los resultados obtenidos del  $MSDI-PreSMoRun_{01}$  no ofrecen una interpretación referente a almacenamientos superficiales o subterráneos, la metodología ofrece la versatilidad necesaria para agregar o sustituir variables, de modo que se reflejen los impactos de interés con base en información específica.

Durante la revisión de los resultados de los índices multivariados se observó que los resultados del  $MSDI-PreSMo$  —que integra la precipitación con la humedad del suelo— y el  $MSDI-PreSMoRun$  —que integra la precipitación con la humedad del suelo y el escurrimiento— guardan una significativa semejanza. Para cuantificar el grado en que estos dos índices se asemejan, fue revisada su dispersión combinada para todo el periodo disponible (1980-2016) y los resultados se muestran en la Figura 4.28.

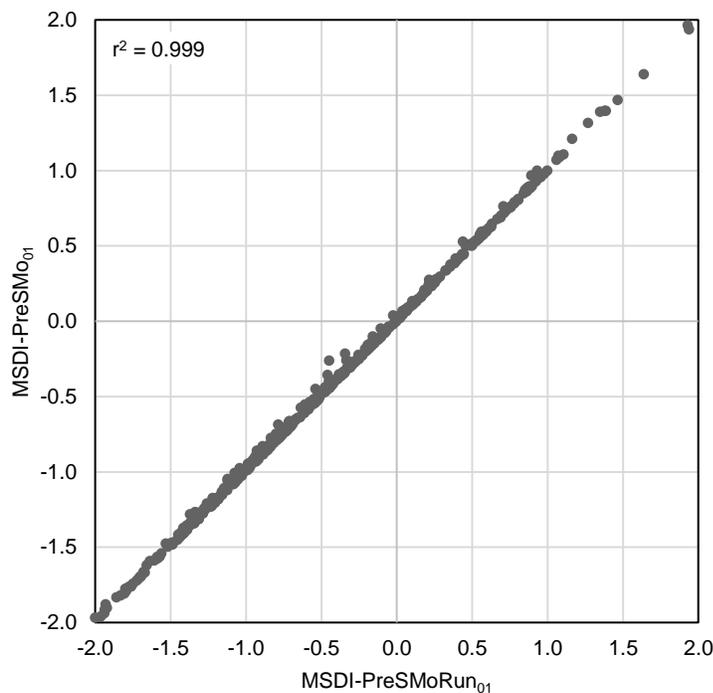


Figura 4.28: Gráfico de dispersión del índice bivariado de sequía  $MSDI-PreSMo_{01}$  y el índice trivariado de sequía  $MSDI-PreSMoRun_{01}$  promediados en la extensión de la región hidrológica Nazas-Aguanaval, para el periodo 1980-2016.

Desde un punto de vista pragmático, el resultado de esta revisión puede ser interpretado como una evidencia de que la variable de escurrimiento debe ser eliminada del análisis del índice estandarizado de sequía, dado que ejerce una influencia despreciable en su valor final. No obstante, se presume que este efecto es inducido al promediar en el espacio los valores de los distintos índices. Además, su inclusión en el análisis permite evaluar la importancia de cada variable a lo largo de un evento de sequía por lo que se ha optado por mantenerla.

Además de analizar la intensidad del evento a través del tiempo, ha sido determinado el porcentaje de la región que presentó algún grado de sequía durante el periodo analizado, en función del índice trivariado  $MSDI-PreSMoRun_{01}$ . Estos resultados se muestran en la Figura 4.29.

La Figura 4.30 muestra el conjunto de mapas mensuales de sequía con el índice trivariado  $MSDI-PreSMoRun_{01}$  para el evento de sequía identificado en las series de tiempo promedio de la región hidrológica Nazas-Aguanaval. En éstos se aprecia que, a pesar de que se observó la recuperación de las regiones vecinas, la región analizada se mantuvo por debajo de la normal climatológica durante los 35 meses que duró el evento.

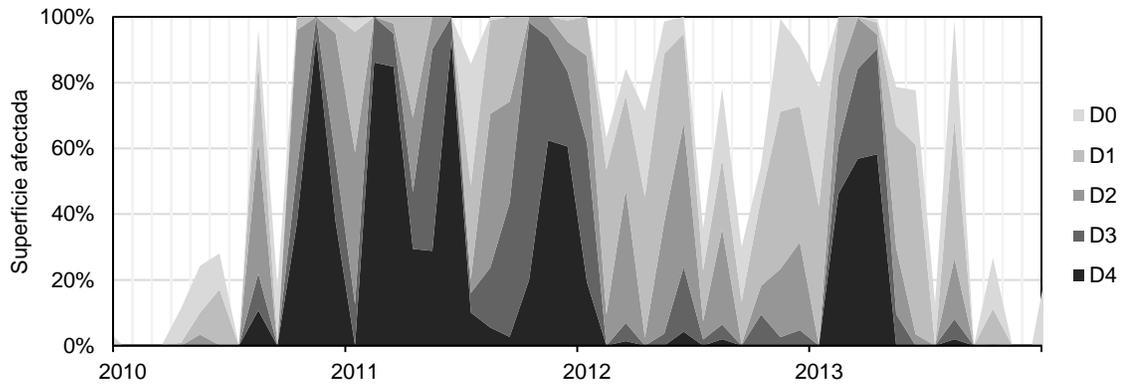


Figura 4.29: Porcentaje de la superficie de la región hidrológica Nazas-Aguanaval afectada por algún grado de sequía, en función del índice trivariado MSDI-PreSMoRun<sub>01</sub> en el periodo 2010-2013.

Resulta interesante analizar, además de la fluctuación de la intensidad de sequía, la variación de su magnitud. La Figura 4.31 presenta los mapas de magnitud de sequía ( $M$ ) correspondientes a noviembre/2010 y junio/2011, los dos periodos en que se presentaron los picos máximos de intensidad del evento ( $\text{MSDI-PreSMoRun}_{01} = -2.14$ ).

La Figura 4.31 del mes de junio/2011 refleja el prolongado periodo transcurrido en que la región analizada —y gran parte del país— permaneció en condiciones de sequía, en cualquier intensidad hasta dicho mes, en contraste con la correspondiente al mes de noviembre/2010, a unos cuantos meses después de iniciada la sequía. La Figura 4.32 muestra la evolución de la magnitud de sequía en la región Nazas-Aguanaval durante el periodo analizado. Según esta gráfica, la magnitud del evento tuvo dos picos en la región, el primero en febrero/2012 y el segundo, el mayor de ambos, en junio/2013. El último pico coincide con el otorgamiento de una “Declaratoria de Desastre Natural en el sector agropecuario, acuícola y pesquero, a consecuencia de la sequía y en virtud de los daños ocasionados por dicho fenómeno que afectó a [39] municipios [...] del Estado de Durango” (SAGARPA, 2013).

#### 4.2.2. Caso 2: Oaxaca 2015

En agosto de 2015 fueron reportadas afectaciones en, al menos, 100 municipios de las regiones La Cañada, Costa, Istmo de Tehuantepec, Mixteca, Cuenca del Papaloapan y Valles Centrales, en Oaxaca. Según estimaciones de la SAGARPA, las pérdidas de maíz en el estado alcanzaron las 43 276 ha de cultivo. Así mismo, la Presidencia Municipal de Asunción de Nochixtlán reportó 600 familias campesinas con pérdida total de cultivo (Briseño, 2015).

Durante el primer trimestre de 2016, continuaron reportes de efectos de la sequía en la

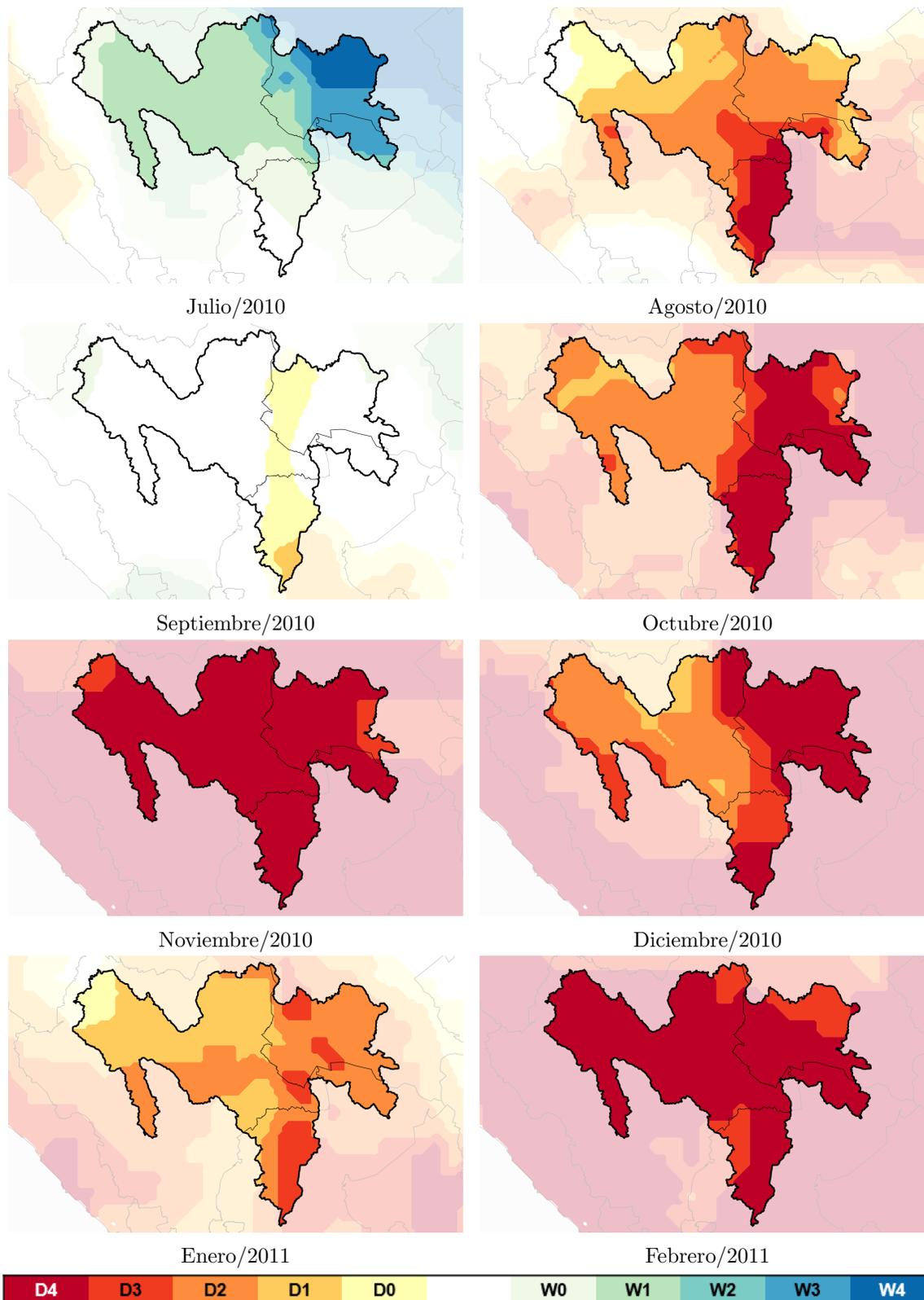


Figura 4.30: Mapas mensuales de la sequía en la región hidrológica Nazas-Aguanaval en el periodo octubre/2010-agosto/2013 con el índice trivariado MSDI-PreSMoRun<sub>01</sub>.

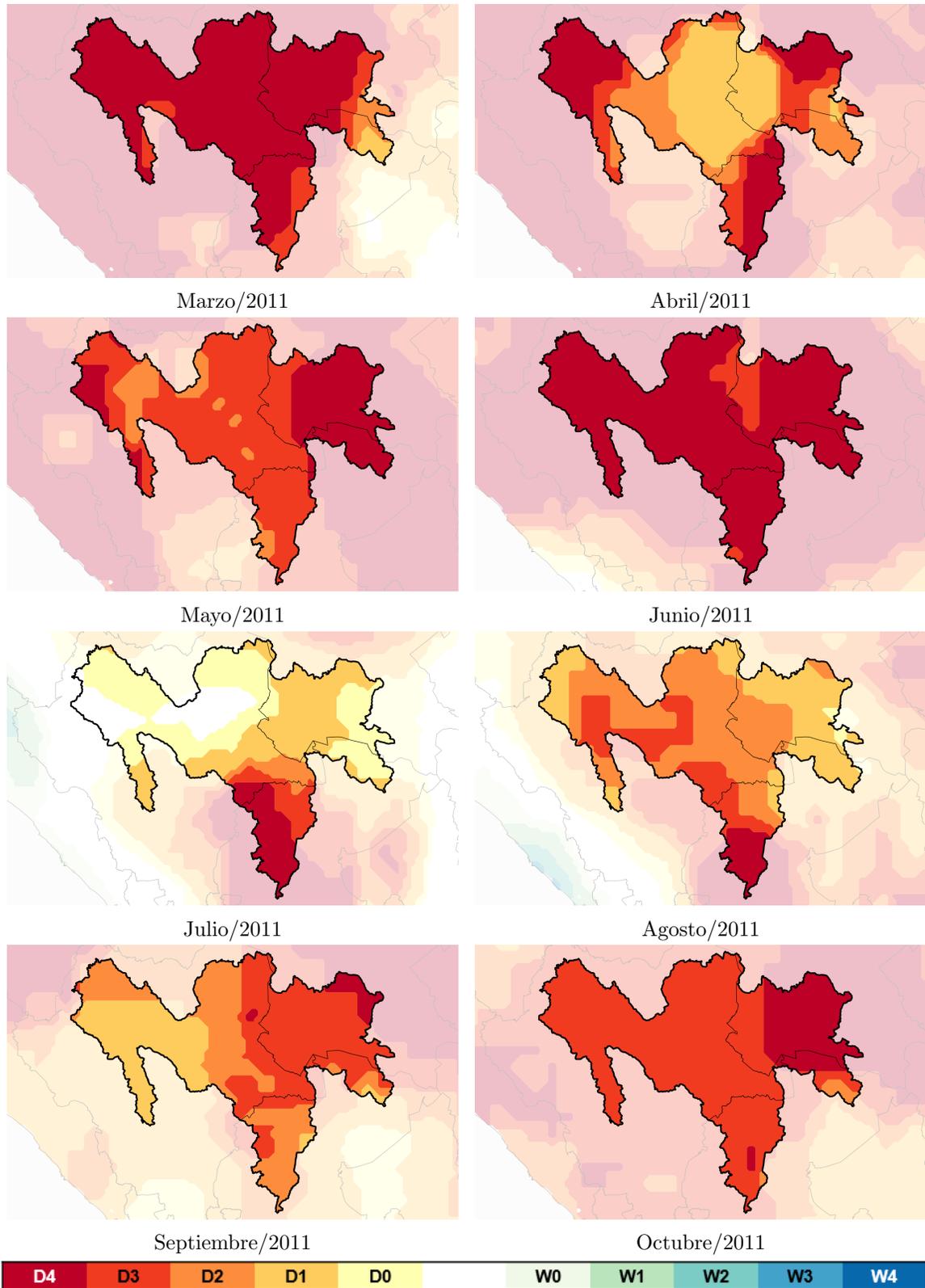


Figura 4.30: Mapas mensuales de la sequía en la región hidrológica Nazas-Aguanaval en el periodo octubre/2010-agosto/2013 con el índice trivariado MSDI-PreSMoRun<sub>01</sub> (Continuación).

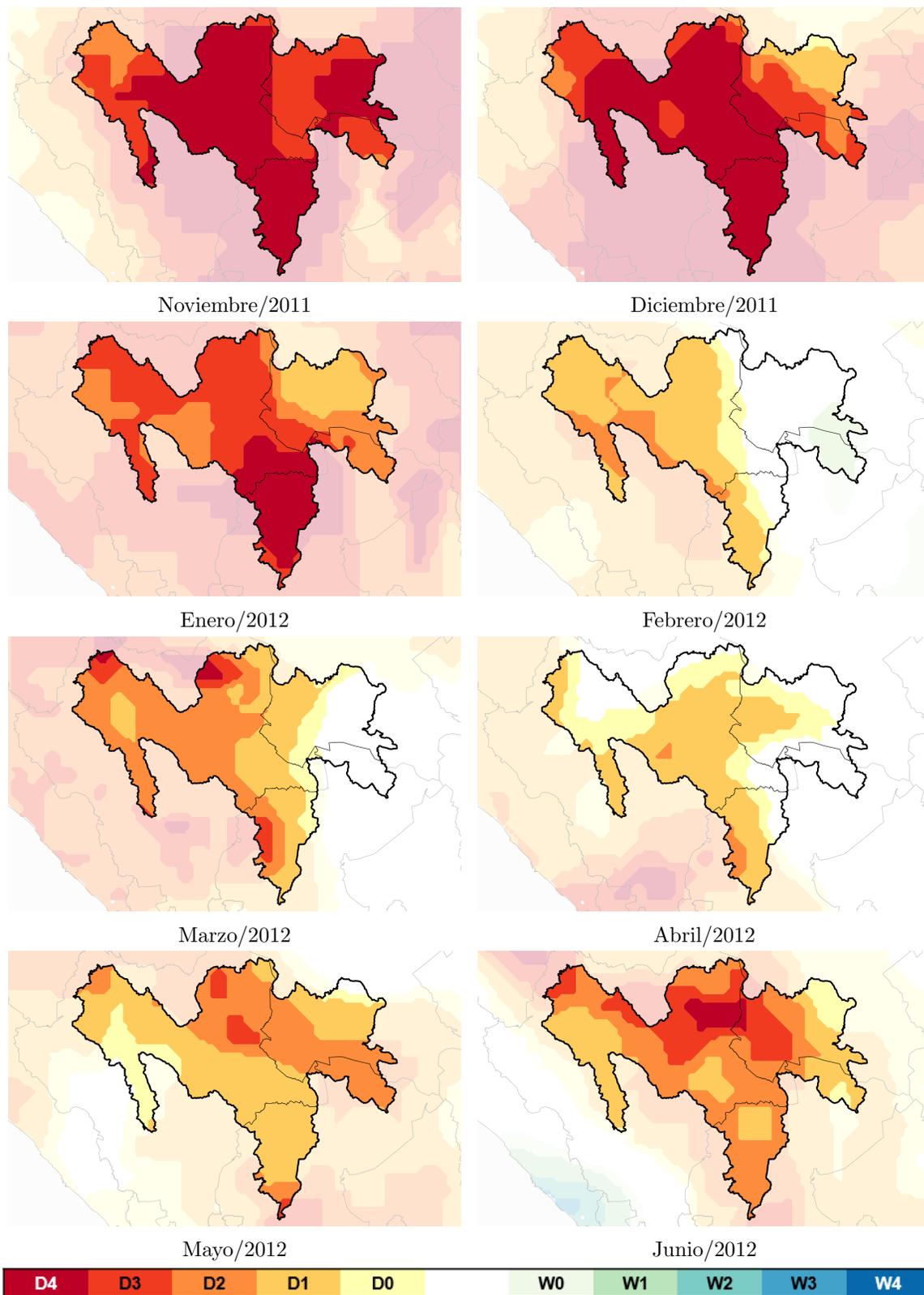


Figura 4.30: Mapas mensuales de la sequía en la región hidrológica Nazas-Aguanaval en el periodo octubre/2010-agosto/2013 con el índice trivariado MSDI-PreSMoRun<sub>01</sub> (Continuación).

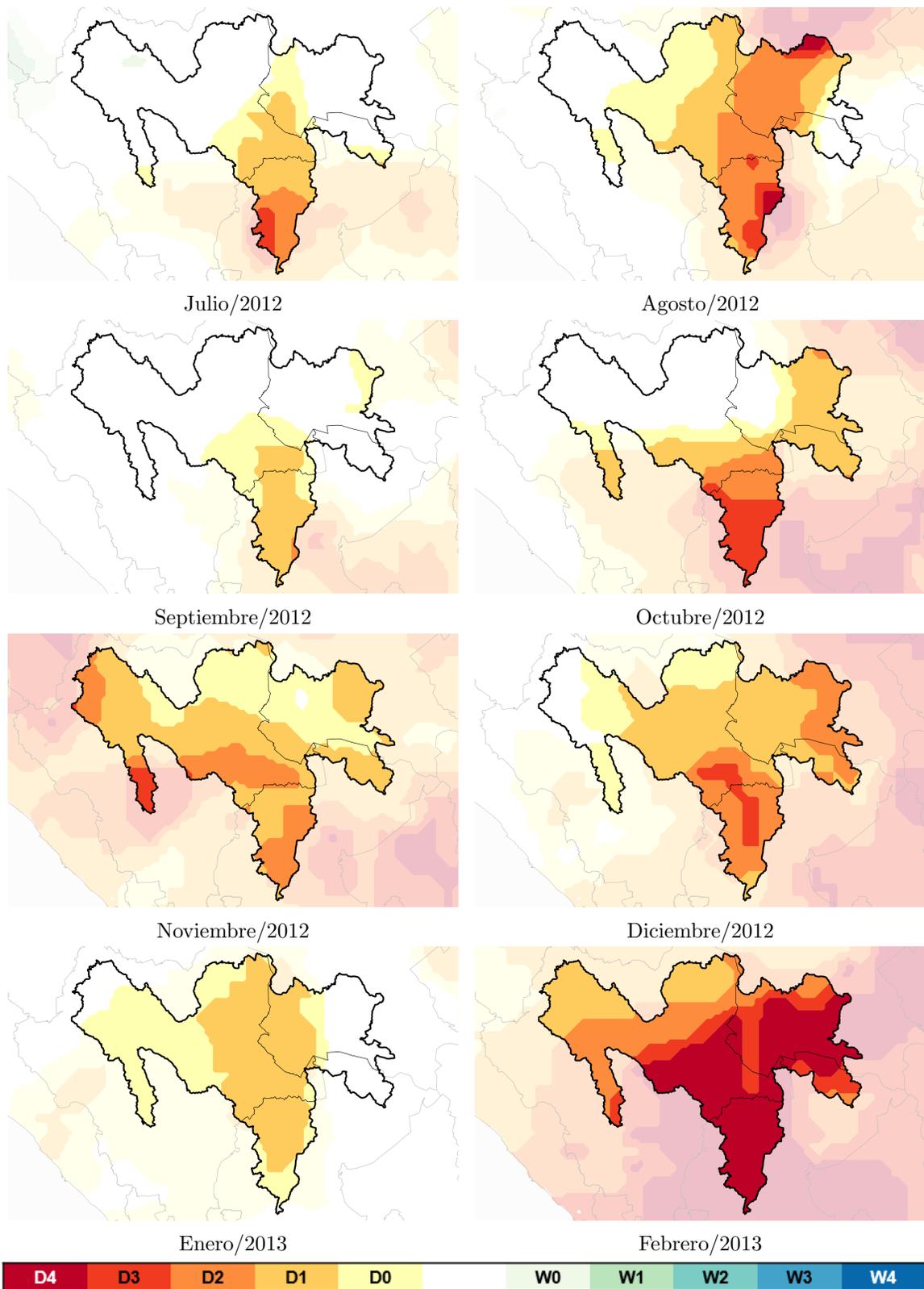


Figura 4.30: Mapas mensuales de la sequía en la región hidrológica Nazas-Aguanaval en el periodo octubre/2010-agosto/2013 con el índice trivariado MSDI-PreSMoRun<sub>01</sub> (Continuación).

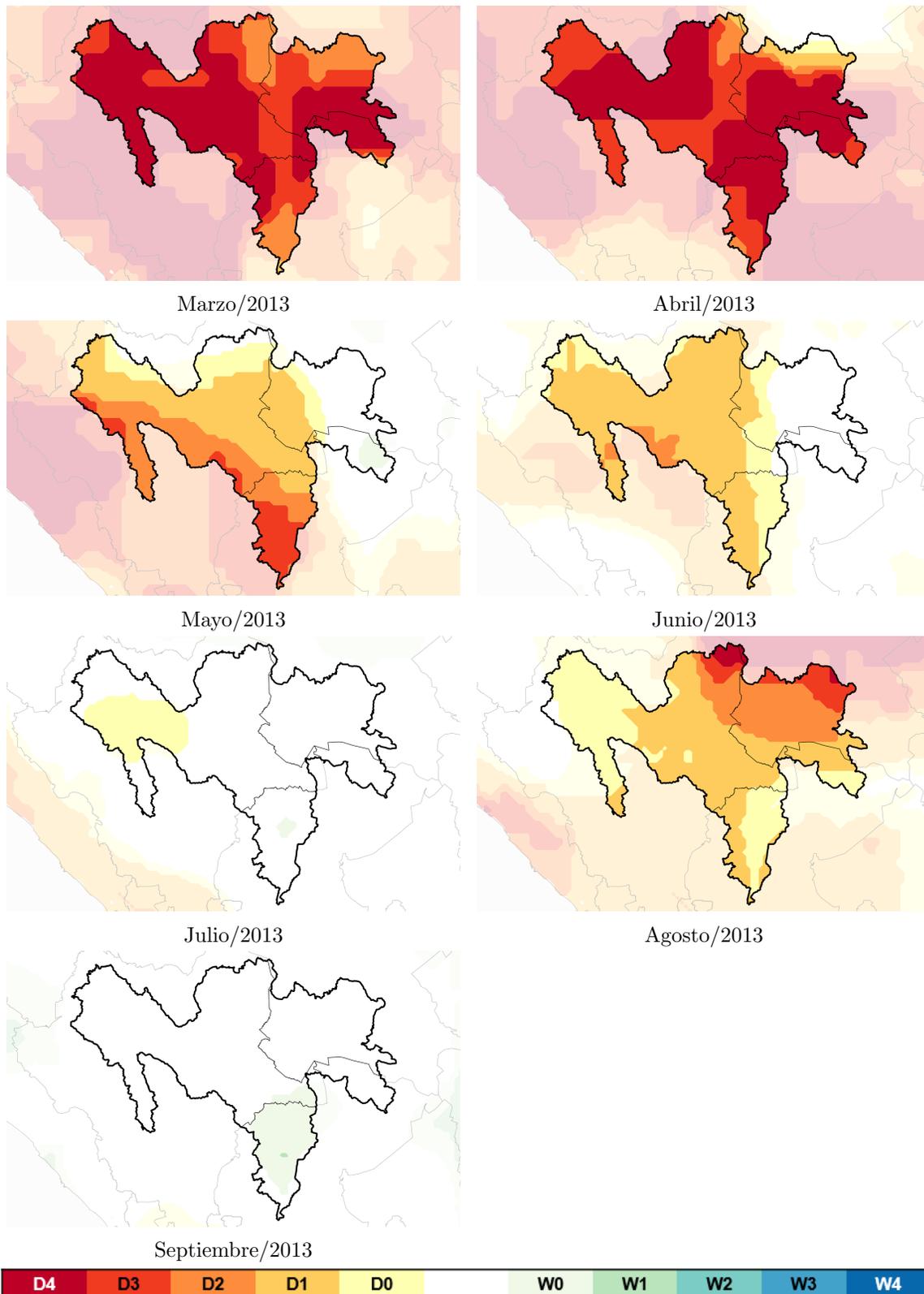


Figura 4.30: Mapas mensuales de la sequía en la región hidrológica Nazas-Aguanaval en el periodo octubre/2010-agosto/2013 con el índice trivariado MSDI-PreSMoRun<sub>01</sub> (Continuación).

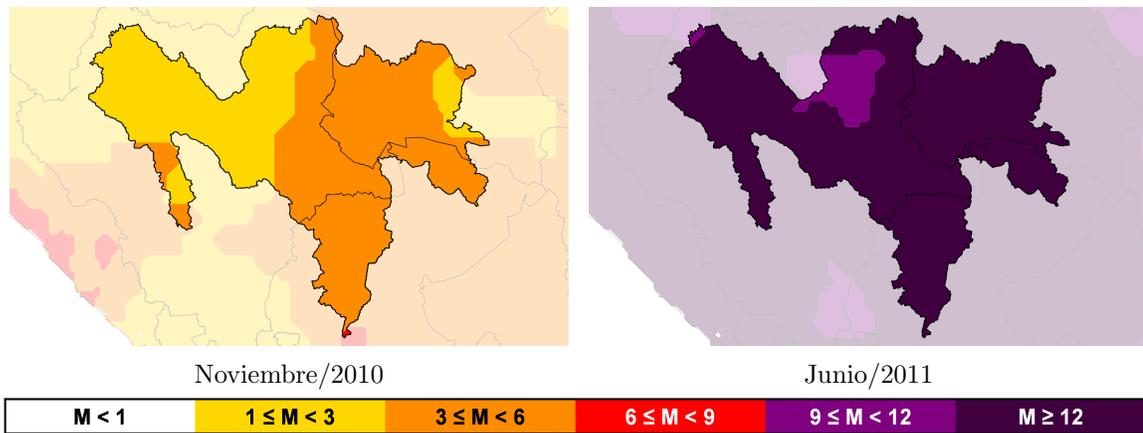


Figura 4.31: Mapas de magnitud de sequía en los periodos de mayor intensidad en la región hidrológica Nazas-Aguanaval durante el evento 2010-2011.

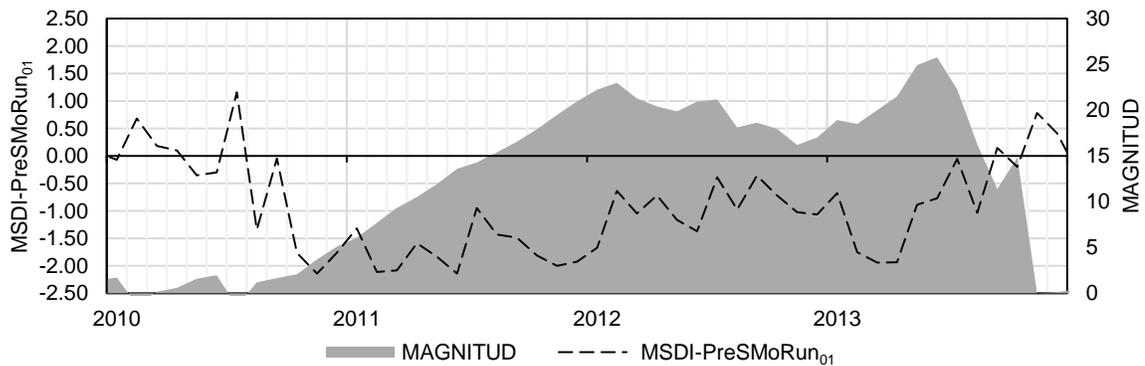


Figura 4.32: Serie de tiempo de magnitud de sequía ( $M$ ) promedio en la región hidrológica Nazas-Aguanaval en el periodo 2010-2013.

región. Comuneros de Ciudad Ixtepec, Oax., reportaron la pérdida del 90 % de las cosechas de sorgo por falta de agua (Vargas, 2016), y la presa Benito Juárez en Jalapa del Marqués, en la región del Istmo de Tehuantepec, descendió hasta un 50 % de su capacidad, lo que dejó al descubierto un templo dominico del Siglo XVI, inundado desde 1962 y visto por última vez en 2008 durante otro sequía (EFE, 2016).

La Figura 4.33 muestra la localización del estado de Oaxaca. A continuación se hará una revisión de la evolución del periodo de sequía dentro del territorio de esta entidad.

Del mismo modo que con el caso 1, en la Figura 4.34 se muestran las escalas temporales de 1, 3, 6 y 12 meses del SPI promedio en el estado de Oaxaca.

El análisis del SPI en el caso Oaxaca 2015 detecta un periodo de cuatro meses (junio-

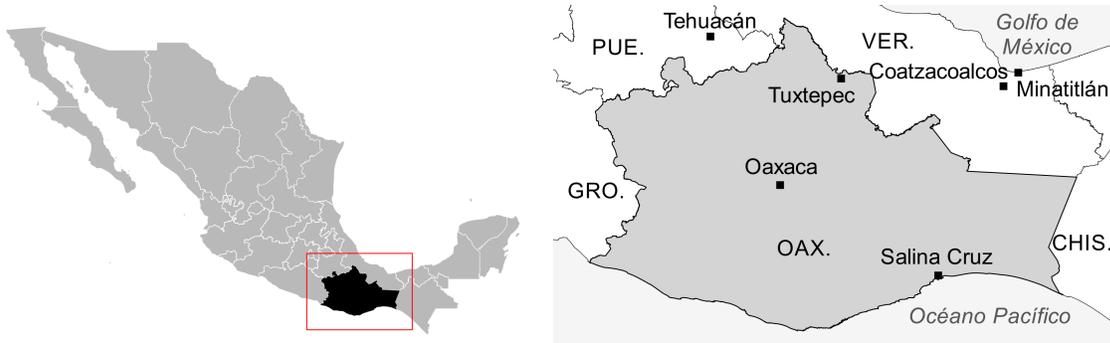


Figura 4.33: Localización del estado de Oaxaca.

octubre/2015) con déficit de precipitación (sequía meteorológica) con intensidad máxima de  $SPI_{01} = -0.9$  (Figura 4.34a). Paralelamente, una secuencia de valores negativos del  $SPI_{03}$  (Figura 4.34b) entre junio y noviembre de 2015 sugiere que la sequía meteorológica pudo tener un efecto en el contenido de humedad del suelo, provocando una sequía agrícola en este periodo con intensidad máxima de  $SPI_{03} = -1.1$ . El efecto acumulativo observado en la serie de tiempo del  $SPI_{06}$  (Figura 4.34c) durante el periodo junio/2015-febrero/2016 puede ser interpretado como un déficit de escurrimiento (sequía hidrológica), cuya mayor intensidad es observada en septiembre/2015 con un valor de  $SPI_{06} = -1.0$ . Finalmente, el  $SPI_{12}$  (Figura 4.34d) refleja una disminución en los niveles de almacenamientos superficiales y subterráneos en el estado (sequía hidrológica e hidrogeológica) que inició en septiembre/2015, tuvo un punto crítico en octubre/2015 con una intensidad de  $SPI_{12} = -0.8$  y al finalizar agosto/2016 persiste en condiciones mínimas con una intensidad de  $SPI_{12} = -0.1$ . El grado de intensidad de la sequía fue *moderada*, en promedio en el estado de Oaxaca, según se observa en las variables afectadas.

La Figura 4.35 muestra las series de tiempo de los índices estandarizados de sequía promedios para el estado de Oaxaca, para una escala temporal de 1 mes.

La serie de tiempo del  $SPI_{01}$  (Figura 4.35a) presenta un periodo de cuatro meses (junio-octubre/2015) con déficit de precipitación (sequía meteorológica) con una intensidad máxima de  $SPI_{01} = -0.9$  durante el mes de agosto/2015. Este evento se ve reflejado también en un déficit de escurrimiento (sequía hidrológica) detectado mediante la serie de tiempo del  $SRI_{01}$  (Figura 4.35b), que persiste hasta noviembre de 2015 y presenta su punto crítico en agosto de ese año, con una intensidad de  $SRI_{01} = -1.0$ . El análisis del  $SSI_{01}$  (Figura 4.35c) permite identificar un periodo de déficit de humedad del suelo (sequía agrícola) entre julio/2015 y marzo/2016, con su mayor intensidad durante el mes de agosto/2015, con un valor de  $SSI_{01} = -1.3$ . Finalmente, la serie de tiempo del  $MSDI-PreSMoRun_{01}$  (Figura 4.35d) integra el déficit de las tres variables en un solo índice, e identifica un periodo

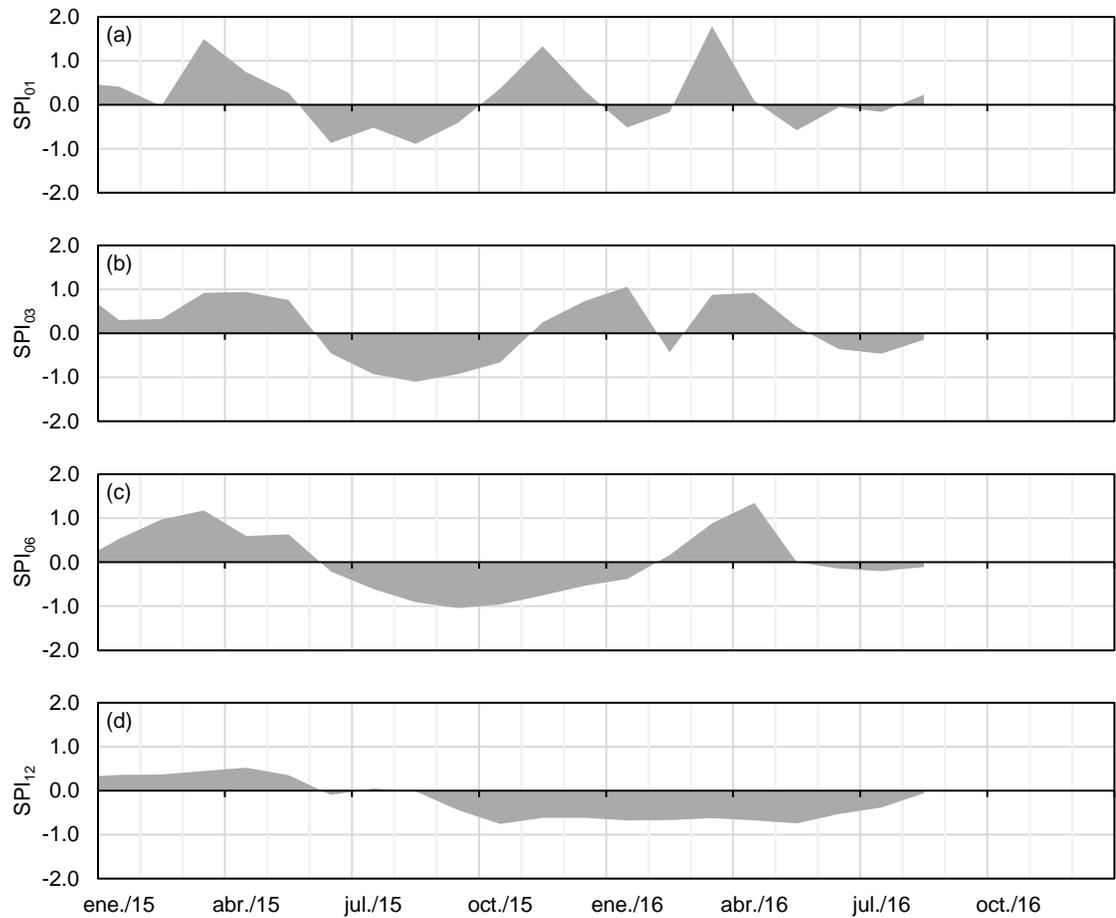


Figura 4.34: Series de tiempo del SPI promedio en el estado de Oaxaca en el periodo 2015-2016.

seco con las siguientes características:

- La sequía inició en junio de 2015 y terminó en marzo de 2016.
- Duración de 9 meses, de los cuales:
  - 1 mes presentó condiciones de *sequía severa* (D2);
  - 6 meses presentaron *sequía moderada* (D1);
  - 2 meses se encontraron dentro del rango *normal*, pero por debajo de la mediana de humedad.
- Intensidad máxima de sequía de  $MSDI-PreSMoRun_{01} = -1.4$ , alcanzada en agosto/2015.

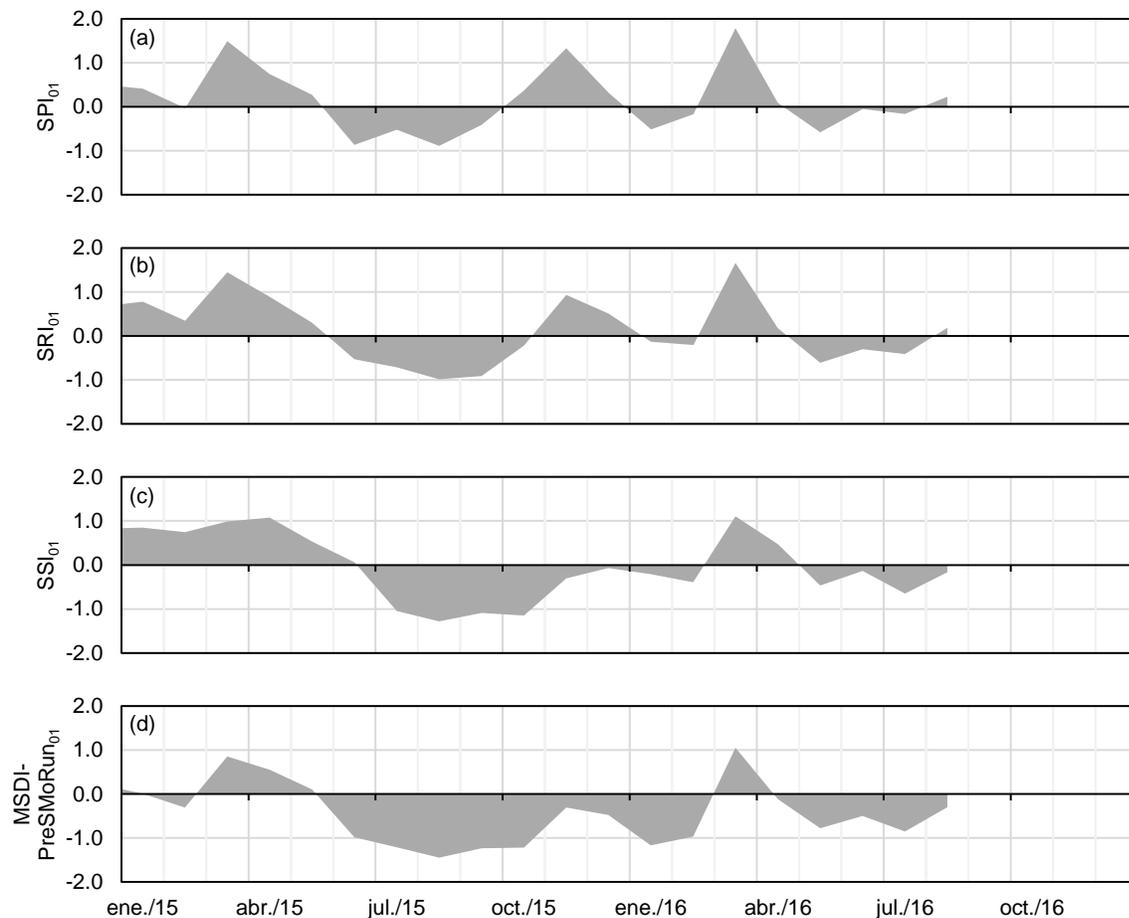


Figura 4.35: Series de tiempo de los índices estandarizados de sequía promedio en el estado de Oaxaca en el periodo 2015-2016.

Además, el MSDI-PreSMoRun<sub>01</sub> señala que después de la breve recuperación de las condiciones de humedad durante el mes de marzo de 2016, desde abril de este año continúan las condiciones de sequía en el estado con una intensidad *moderada*. La Figura 4.36 muestra el porcentaje del estado afectado por algún grado de sequía durante el periodo analizado, en función del índice trivariado. La mayor extensión de las condiciones de sequía fue observada entre julio y octubre de 2015, periodo en que más del 90% del estado se encontraba en algún grado de sequía. No obstante, durante enero y febrero de 2016 se volvió a observar una difusión de los efectos de la sequía que alcanzó un poco más de dos terceras partes del estado.

En este caso también fue observada una importante semejanza entre las series de tiempo del MSDI-PreSMo<sub>01</sub> y el MSDI-PreSMoRun<sub>01</sub> (Figura 4.37), y los resultados apuntaron hacia el mismo hallazgo tenido en el caso 1: la variable de escurrimiento muestra una influencia

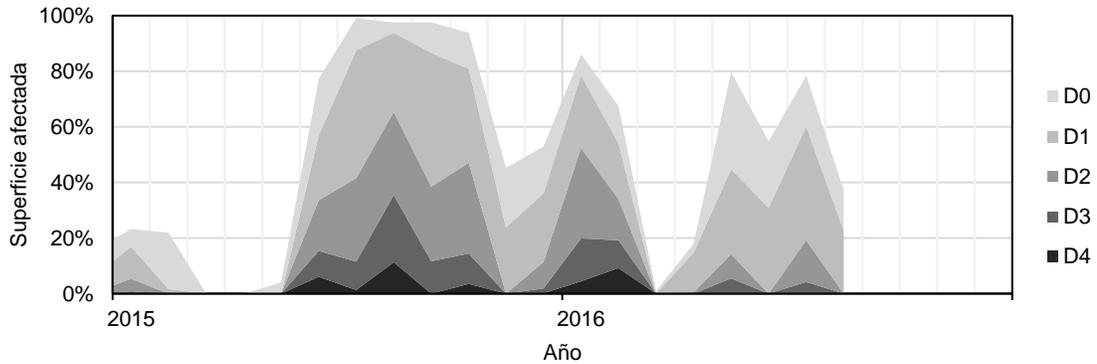


Figura 4.36: Porcentaje de la superficie del estado de Oaxaca afectada por algún grado de sequía, en función del índice trivariado MSDI-PreSMoRun<sub>01</sub> en el periodo 2015-2016.

mínima en el resultado final del índice estandarizado trivariado de sequía. No obstante, su análisis ofrece información acerca del proceso de propagación del déficit de agua, por lo que se ha decidido mantener el uso.

El uso del índice multivariado MSDI-PreSMoRun<sub>01</sub> ha logrado capturar la persistencia de la sequía a través de su proceso de propagación con base en información específica de cada una de las variables involucradas.

La Figura 4.38 muestra el conjunto de mapas mensuales de sequía con el índice trivariado MSDI-PreSMoRun<sub>01</sub> para el evento de sequía identificado en las series de tiempo promedio del estado de Oaxaca.

La Figura 4.39 muestra la evolución de la magnitud de sequía en el estado de Oaxaca durante el periodo analizado. Según esta gráfica, la magnitud del evento tuvo su punto crítico en febrero de 2016.

El análisis de los dos eventos reproducidos indica que el MSDI es una herramienta eficaz en la detección del inicio y persistencia de la sequía en México. Se comprobó que su aplicación otorga una severidad mayor a la ocurrencia simultánea del déficit en múltiples variables, que la correspondiente a cada una de manera individual. Los resultados de este índice multivariado permiten reflejar toda la extensión temporal de un evento de sequía en una sola serie de tiempo.

Además, el uso conjunto del MSDI y los índices estandarizados univariados de las variables integradas en el primero, permite definir cuál presentó una mayor ponderación en la intensidad de sequía en cada paso de tiempo analizado. Esto hace posible el análisis detallado de cada evento y estimar la evolución de los principales impactos a lo largo de su duración.

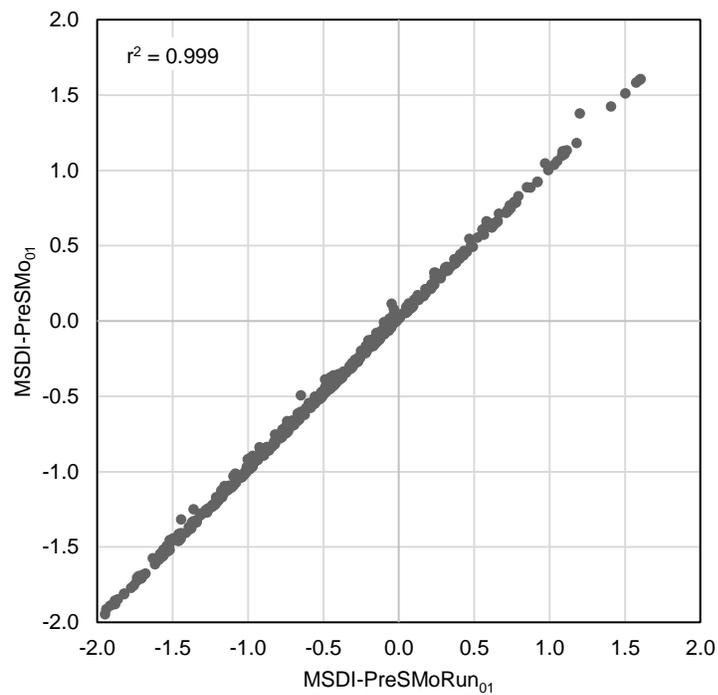


Figura 4.37: Gráfico de dispersión del índice bivariado de sequía MSDI-PreSMo<sub>01</sub> y el índice trivariado de sequía MSDI-PreSMoRun<sub>01</sub> promediados en la extensión del estado de Oaxaca, para el periodo 1980-2016.

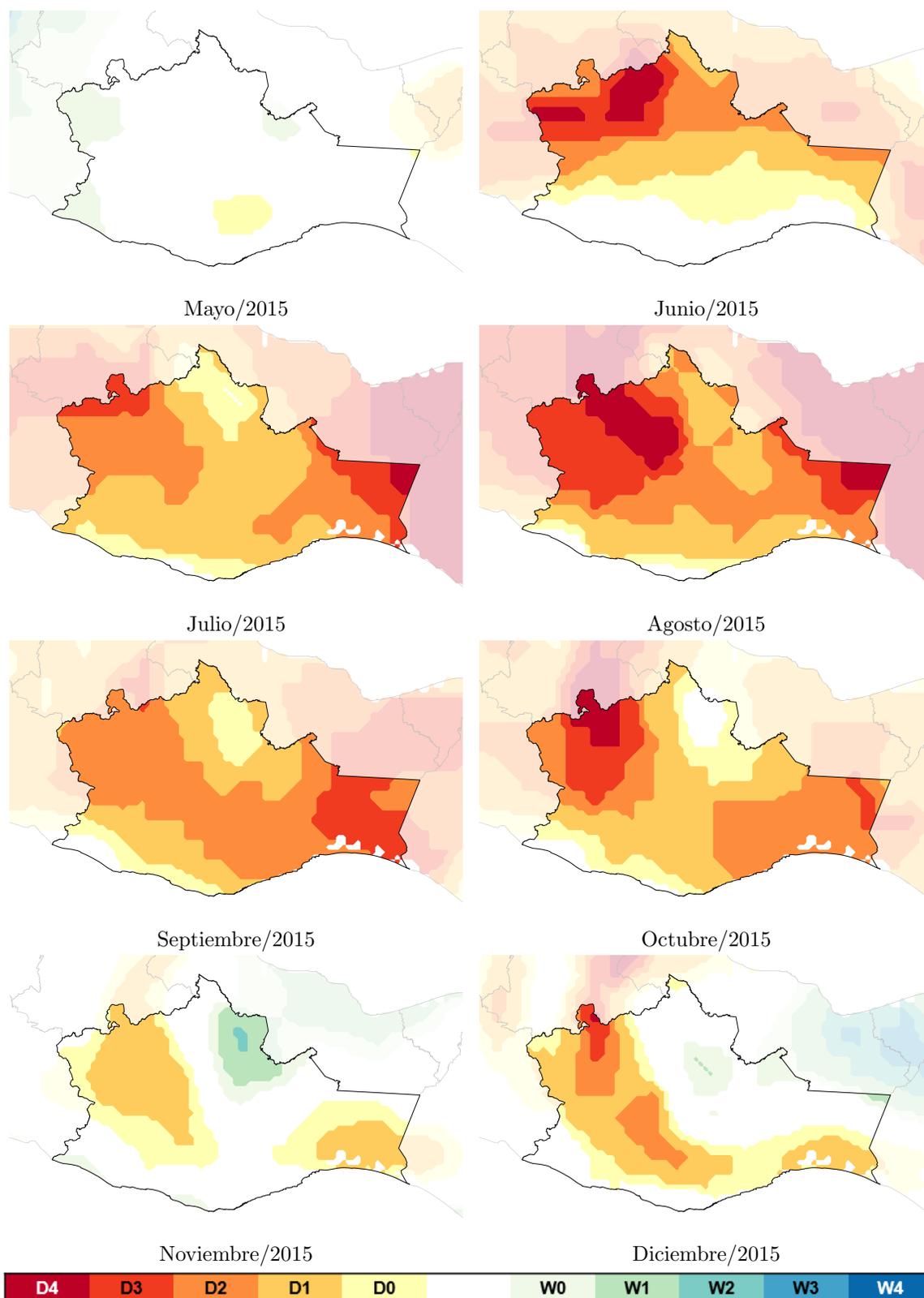


Figura 4.38: Mapas mensuales de la sequía en el estado de Oaxaca en el periodo junio/2015-febrero/2016 con el índice trivariado MSDI-PreSMoRun<sub>01</sub>.

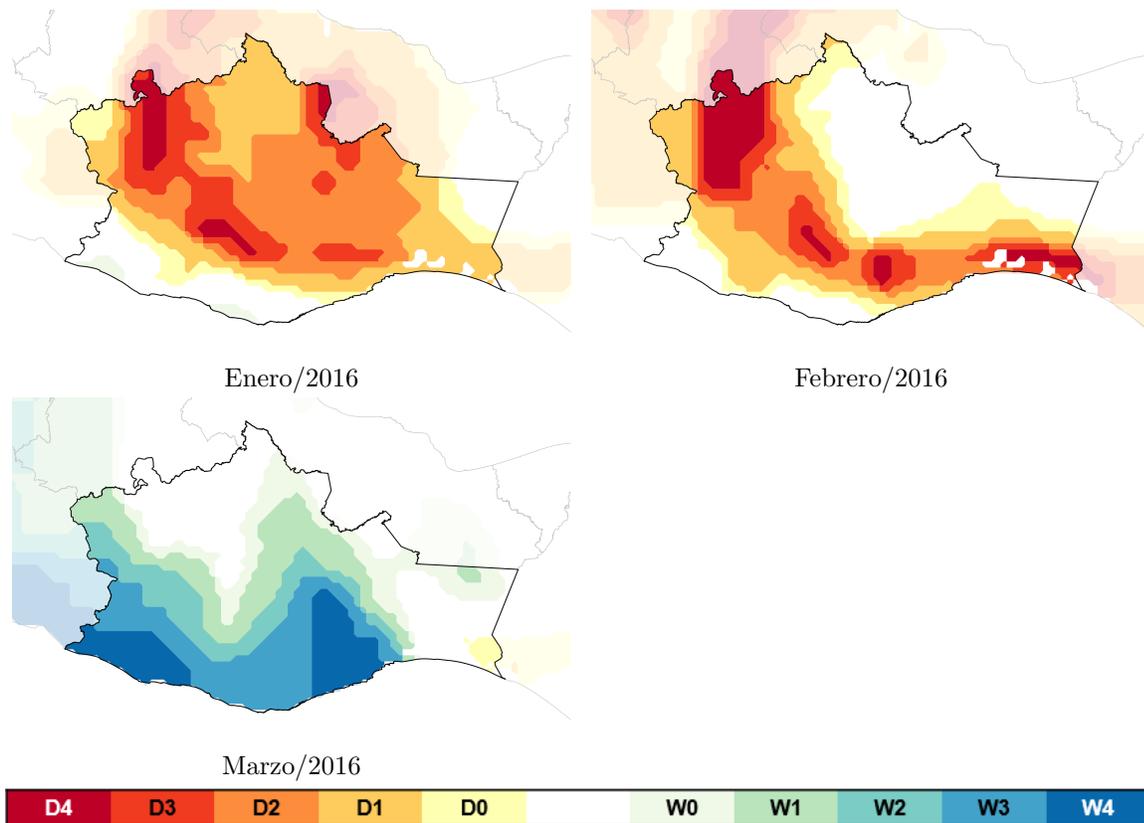


Figura 4.38: Mapas mensuales de la sequía en el estado de Oaxaca en el periodo junio/2015-febrero/2016 con el índice trivariado MSDI-PreSMoRun<sub>01</sub> (Continuación).

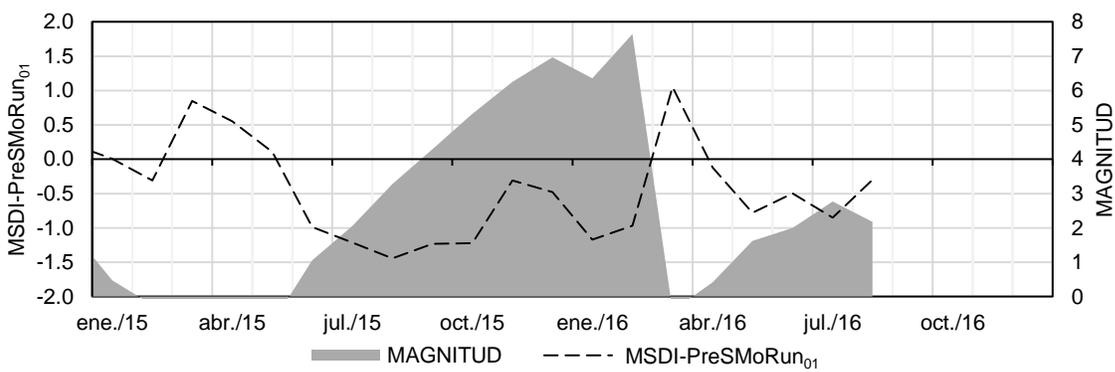


Figura 4.39: Serie de tiempo de magnitud de sequía promedio en el estado de Oaxaca en el periodo 2015-2016.

## Capítulo 5

# Conclusiones

El presente estudio ha empleado un enfoque multivariado para el monitoreo de sequías en México a través del Índice Estandarizado Multivariado de Sequía (MSDI) propuesto por Hao y AghaKouchak (2014), empleando series de tiempo de variables hidrológicas derivadas de productos de modelos de superficie terrestre que incorporan asimilación de datos (AD). Con base en los resultados obtenidos se ha llegado a una serie de conclusiones, que a continuación se describen.

- Desempeño de los productos de asimilación de datos y reanálisis

El producto de AD que demostró mejor desempeño para reproducir la magnitud y variación de la precipitación y escurrimiento fue MERRA-2, debido a los valores que presentaron sus métricas de ajuste con respecto a las observaciones en estaciones climatológicas e hidrométricas.

El producto de AD que, en términos generales, demostró el desempeño más pobre en los sitios evaluados fue GLDAS-1, dado que, por un lado, muestra una gran dispersión en su variable de precipitación con respecto a los registros de las estaciones climatológicas en tierra, y, por otro lado, subestima sistemáticamente la variable de escurrimiento, con respecto a los aforos en estaciones hidrométricas.

El producto GLDAS-2, de momento, no es apto para el monitoreo de sequías dado que se encuentra desactualizado. Al momento de redacción de este documento se han acumulado cuatro meses de retraso en la publicación de nueva información. No obstante, su desempeño para reproducir las variables de precipitación y escurrimiento es aceptable.

El desempeño de los productos mejora conforme incrementa la escala temporal

de análisis.

- Enfoque multivariado de monitoreo de sequías

El uso de múltiples variables para monitorear la intensidad de sequía a través del MSDI permite detectar la propagación de la sequía a través del sistema hidrológico con información específica de cada variable analizada. Esto evita el uso de ventanas móviles para reflejar artificialmente los impactos de una sequía en distintas fuentes de agua.

Los resultados de este índice multivariado permiten reflejar toda la extensión temporal de un evento de sequía en una sola serie de tiempo.

Una limitación importante para este método es la disponibilidad y homogeneidad de información necesaria para ser incluida en el índice multivariado. No obstante, el acelerado avance de los productos globales de datos hidroclimatológicos mallados ofrece una valiosa alternativa para cubrir esta limitación.

El análisis de la magnitud de sequía, como complemento del estudio de su intensidad, ofrece información relevante acerca de la evolución de un evento de sequía. Por ejemplo, presenta un panorama claro acerca de las regiones con mayor persistencia de sequía, lo que puede ser útil para establecer zonas de atención prioritaria durante un desastre.

Los mapas de sequía generados a partir del MSDI han logrado reproducir eficientemente las condiciones de déficit ocurridas en el país en dos eventos analizados (Nazas-Aguanaval 2010-2013 y Oaxaca, 2015-2016).

El uso conjunto del MSDI y los índices estandarizados univariados de las variables integradas en el primero, permite definir la ponderación sobre la intensidad que cada una presentó en cada paso de tiempo analizado. Esto hace posible el análisis detallado de cada evento y estimar la evolución de los principales impactos a lo largo de su duración.

- Futuras líneas de estudio

En este estudio fue aplicada una interpolación lineal para la generación de mapas de sequía para reducir la carga de cómputo. No obstante, resulta importante evaluar la sensibilidad de los resultados ante diferentes técnicas de interpolación geoespacial.

La metodología propuesta por Hao y AghaKouchak (2014), aplicada en este estudio, usa la fórmula de punteo de Gringorten (1963) para asignar una probabilidad empírica a cada registro (o conjunto de registros). Esta ecuación asume una distribución tipo Gumbel en los datos de las variables analizadas. En futuros trabajos, podría

ser evaluada la sensibilidad de los índices estandarizados de sequía ante el uso de distintos modelos de punteo y funciones de distribución de probabilidad.

El monitoreo de las sequías resulta insuficiente si no se cuenta con una metodología que permita pronosticar la ocurrencia de eventos de sequía a corto plazo. En este sentido, futuras líneas de estudio deberán involucrar el pronóstico de sequías para complementar el análisis de eventos pasados.

Una de las virtudes del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI; McKee, Doesken y Kleist, 1993), en que se basa el MSDI, es su capacidad para detectar y cuantificar periodos de superávit de agua, además del déficit. Sin embargo, esta ventaja no ha sido suficientemente explotada. Resultaría interesante dedicar esfuerzos orientados a definir una interpretación objetiva de los rangos de intensidad de los periodos de superávit de agua y sus implicaciones (*e. g.*, inundaciones, deslizamientos de laderas, etc.).

Los índices multivariados de sequía calculados en este estudio no incluyeron ninguna variable asociada a la sequía hidrogeológica, como el nivel freático, el volumen de almacenamiento, etc. En estudios posteriores, la metodología expuesta en este documento podría ser probada incorporando dichas variables derivadas de mediciones de percepción remota. Una alternativa que valdría la pena explorar es el uso de la misión *Gravity Recovery and Climate Experiment* (Experimento de Recuperación Gravitatoria y Clima, GRACE), cuya aplicabilidad en este campo fue explorada por Rodell y Famiglietti (2002).

La evaluación realizada en este estudio acerca del ajuste de los productos de AD tiene un alcance indicativo. Para conocer a detalle la precisión en todo el territorio mexicano, futuros trabajos podrían consistir en una evaluación exhaustiva de la información de los conjuntos de datos de GLDAS-1, GLDAS-2 y MERRA-2.



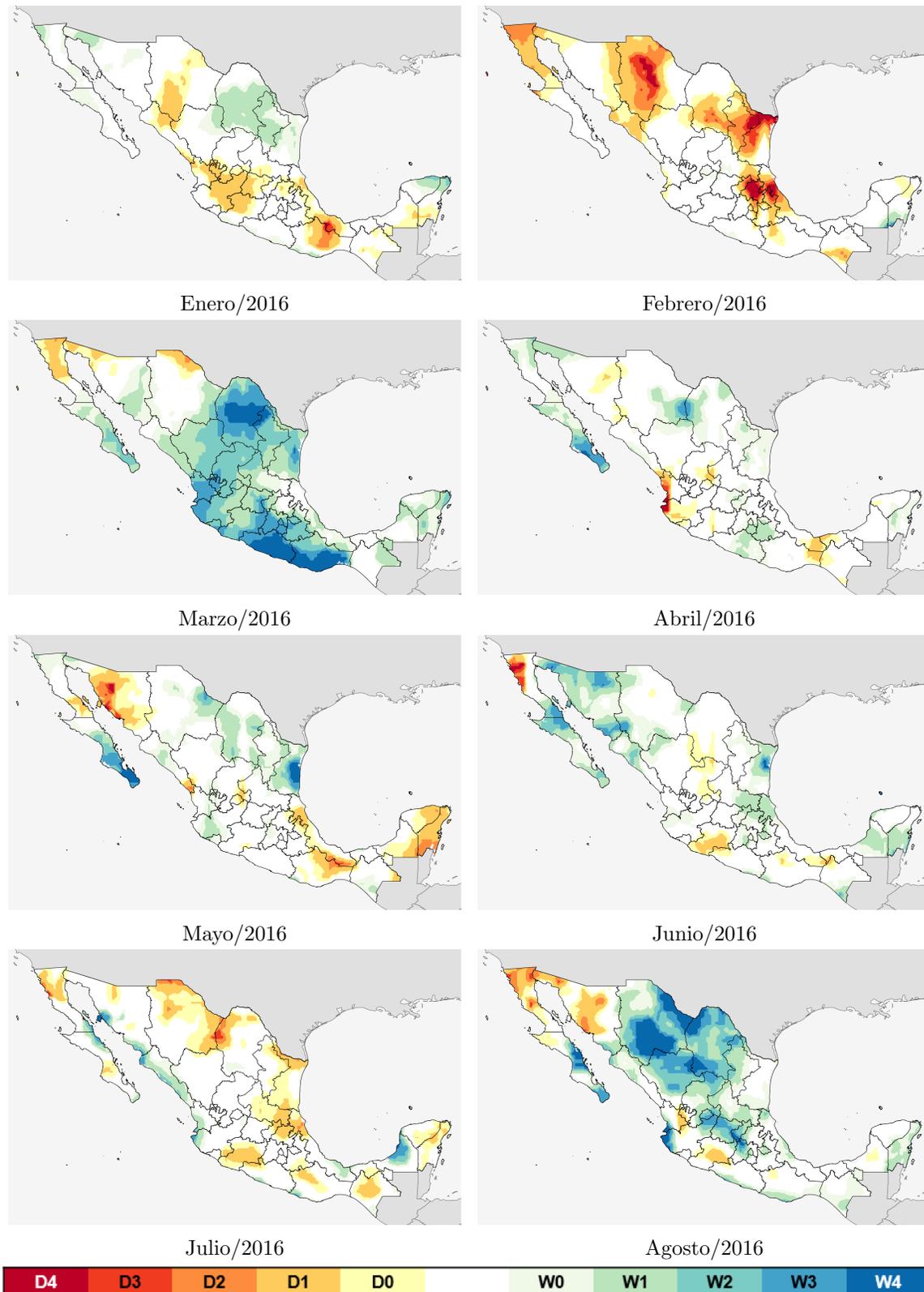
## Apéndice A

# Mapas de sequía en México en 2016

Dentro de los trabajos desarrollados en el presente estudio, fueron generados mapas mensuales de sequía para el periodo enero/1980-agosto/2016. Cada mes en dicho periodo cuenta con un mapa correspondiente a cada uno de seis índices estandarizados de sequía, a saber: (i) Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), (ii) Índice Estandarizado de Humedad del Suelo (SSI), (iii) Índice Estandarizado de Escurrimiento (SRI), (iv) Índice Estandarizado Multivariado de Sequía para Precipitación y Escurrimiento (MSDI-PreRun), (v) Índice Estandarizado Multivariado de Sequía para Precipitación y Humedad del Suelo (MSDI-PreSMo), y (vi) Índice Estandarizado Multivariado de Sequía para Precipitación, Escurrimiento y Humedad del Suelo (MSDI-PreSMoRun). Cada uno reportado en distintos mapas para 1, 3, 6, 9 y 12 meses de escala temporal.

La cantidad de información es muy grande, por lo que en este apéndice se incluye solamente el conjunto de mapas correspondiente al periodo enero-agosto de 2016. El total de mapas podrá encontrarse en el sitio web del Observatorio Mexicano de Sequías (consultar el Apéndice B para conocer los detalles del sitio).

Las Figuras A.1 a A.7 presentan los mapas de sequía en México en función de los índices univariados de sequía (*i. e.*, SPI, SRI y SSI). Posteriormente, las Figuras A.8 a A.9 muestran los mapas de los índices bivariados de sequía (*i. e.*, MSDI-PreRun y MSDI-PreSMo). Finalmente, la Fig. A.10 contiene los mapas correspondientes al índice trivariado de sequía (*i. e.*, MSDI-PreSMoRun).

Figura A.1:  $SPI_{01}$  en México en el periodo enero-agosto de 2016.

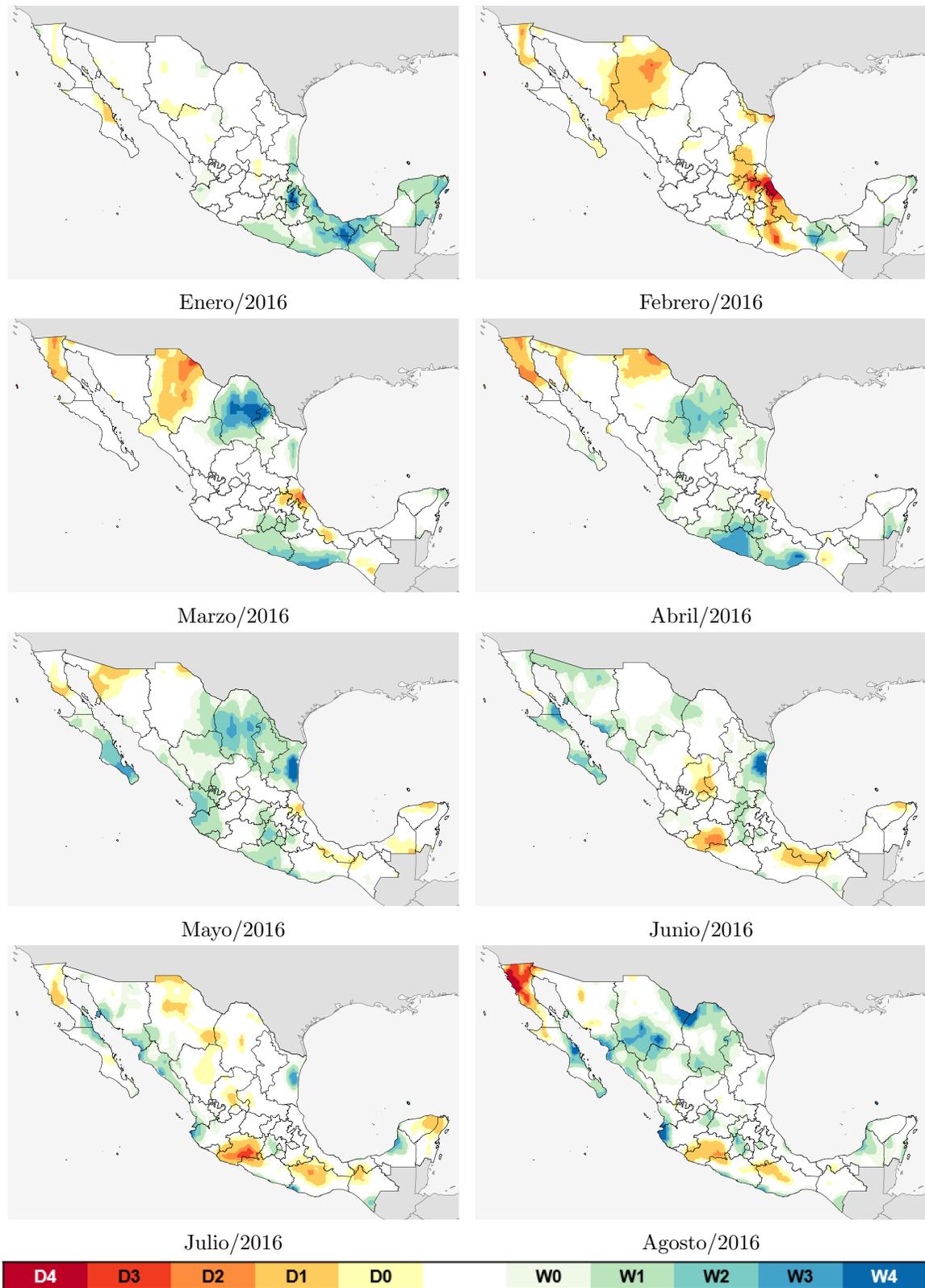


Figura A.2: SPI<sub>03</sub> en México en el periodo enero-agosto de 2016.

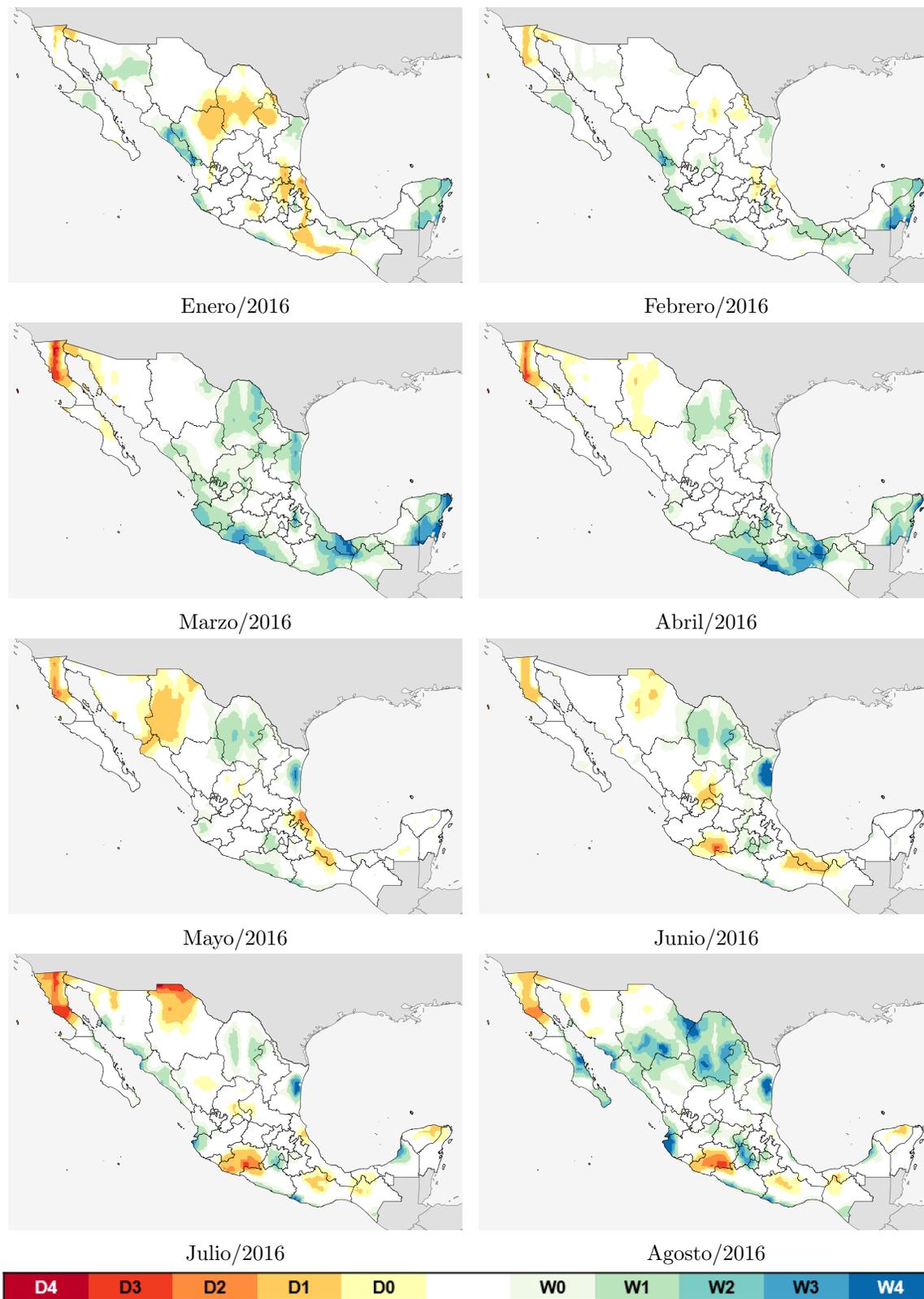


Figura A.3: SPI<sub>06</sub> en México en el periodo enero-agosto de 2016.

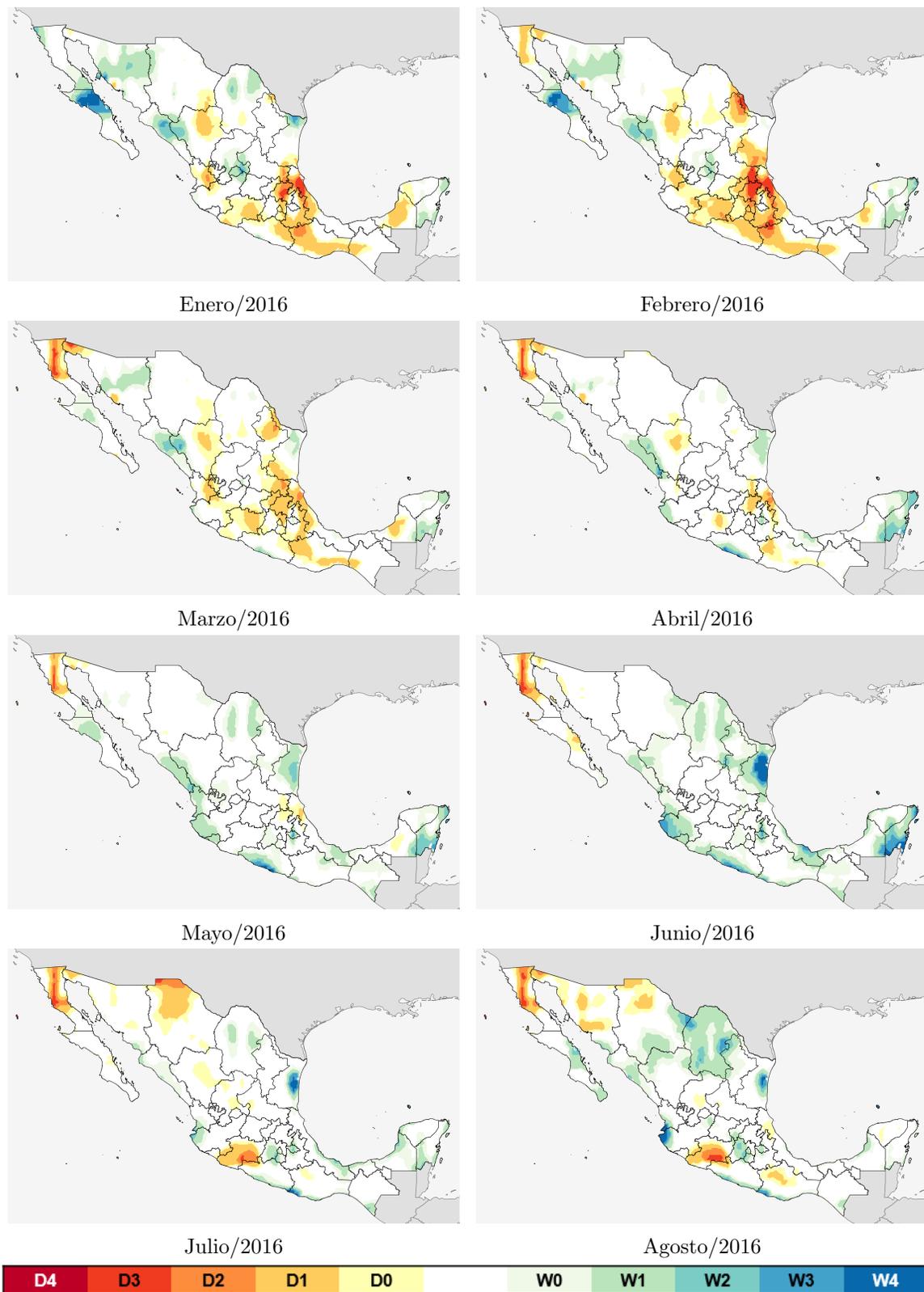


Figura A.4: SPI<sub>09</sub> en México en el periodo enero-agosto de 2016.

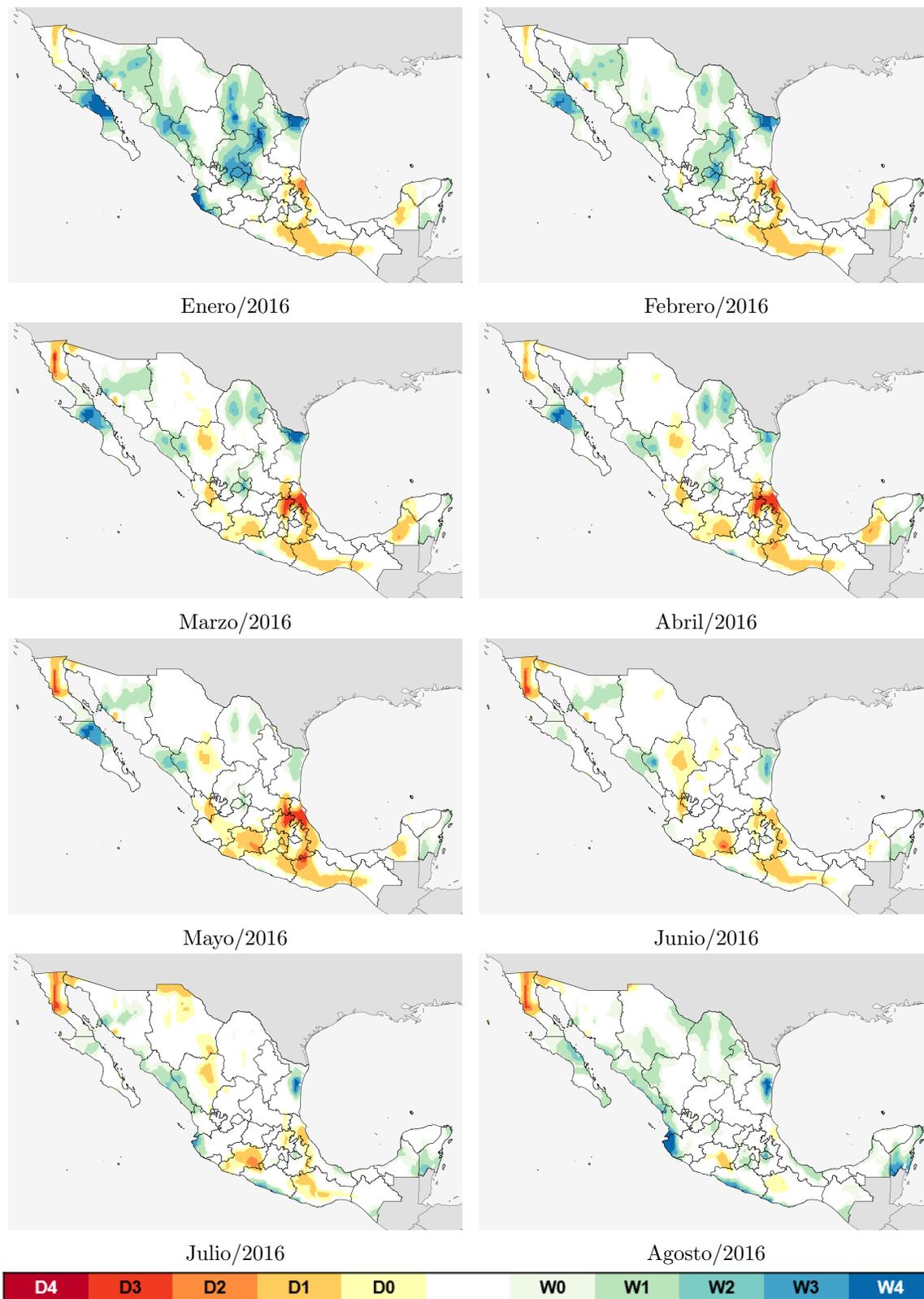


Figura A.5: SPI<sub>12</sub> en México en el periodo enero-agosto de 2016.

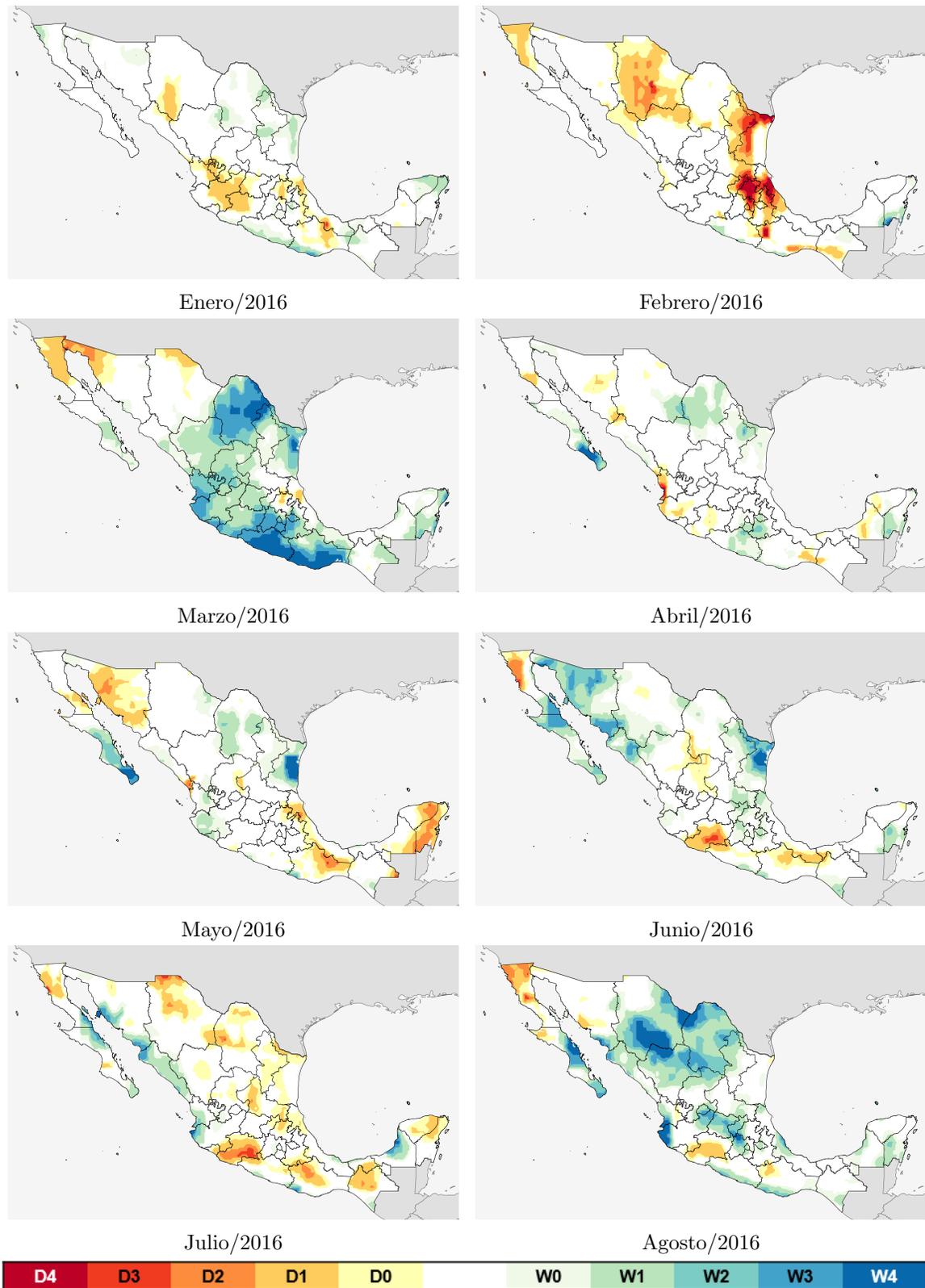


Figura A.6: SRI<sub>01</sub> en México en el periodo enero-agosto de 2016.

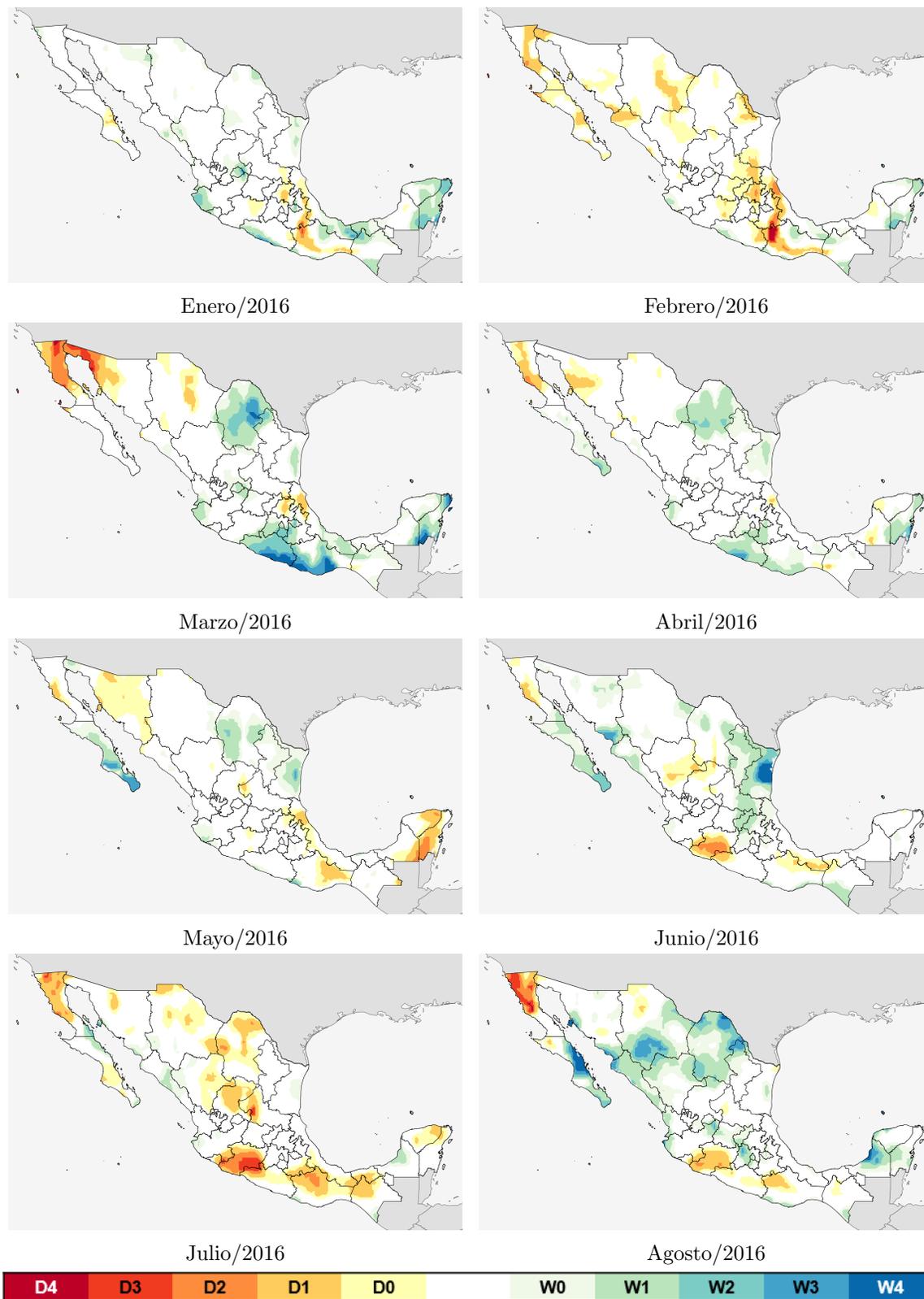


Figura A.7: SSI<sub>01</sub> en México en el periodo enero-agosto de 2016.

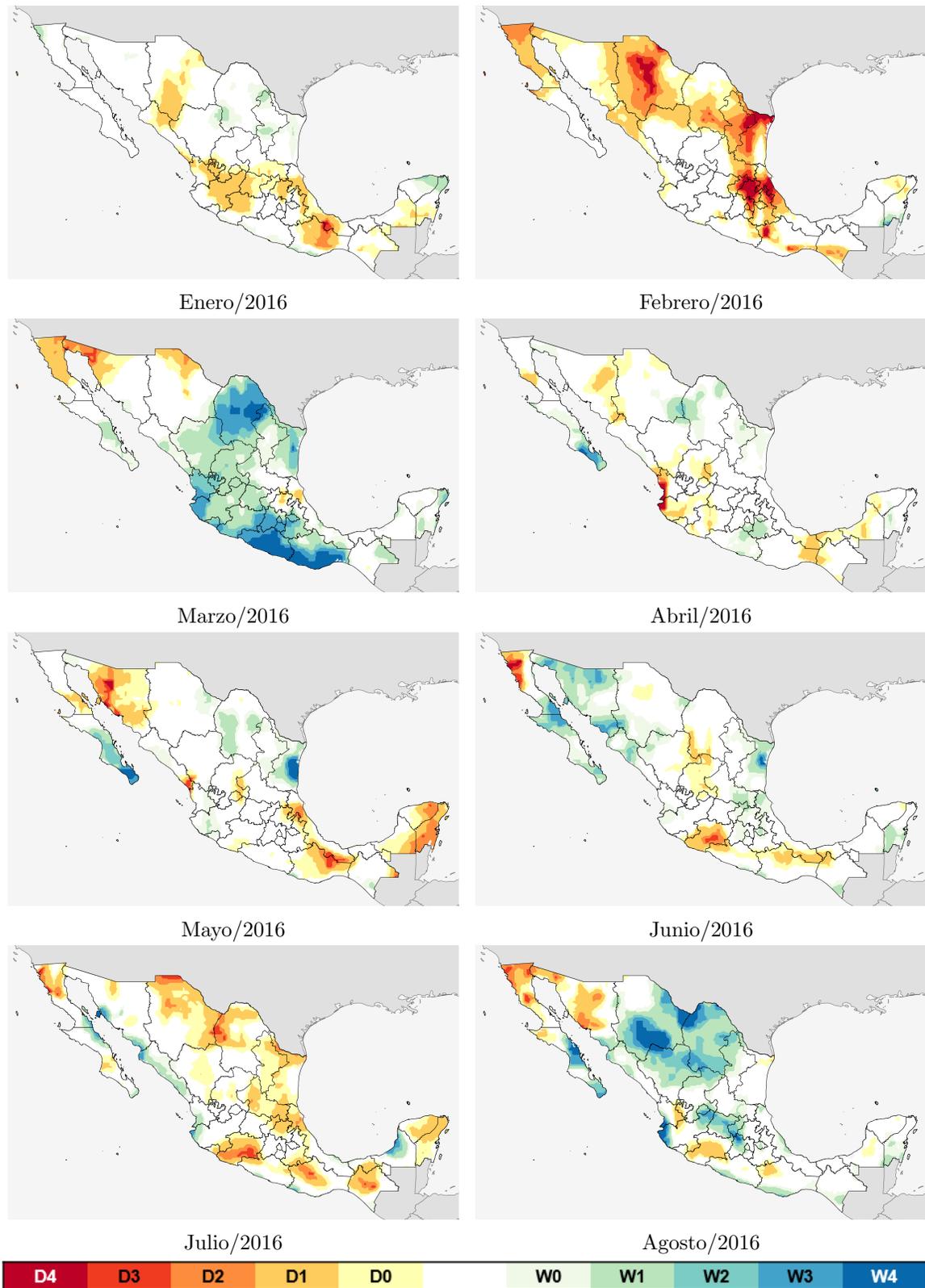


Figura A.8: MSDI-PreRun<sub>01</sub> en México en el periodo enero-agosto de 2016.

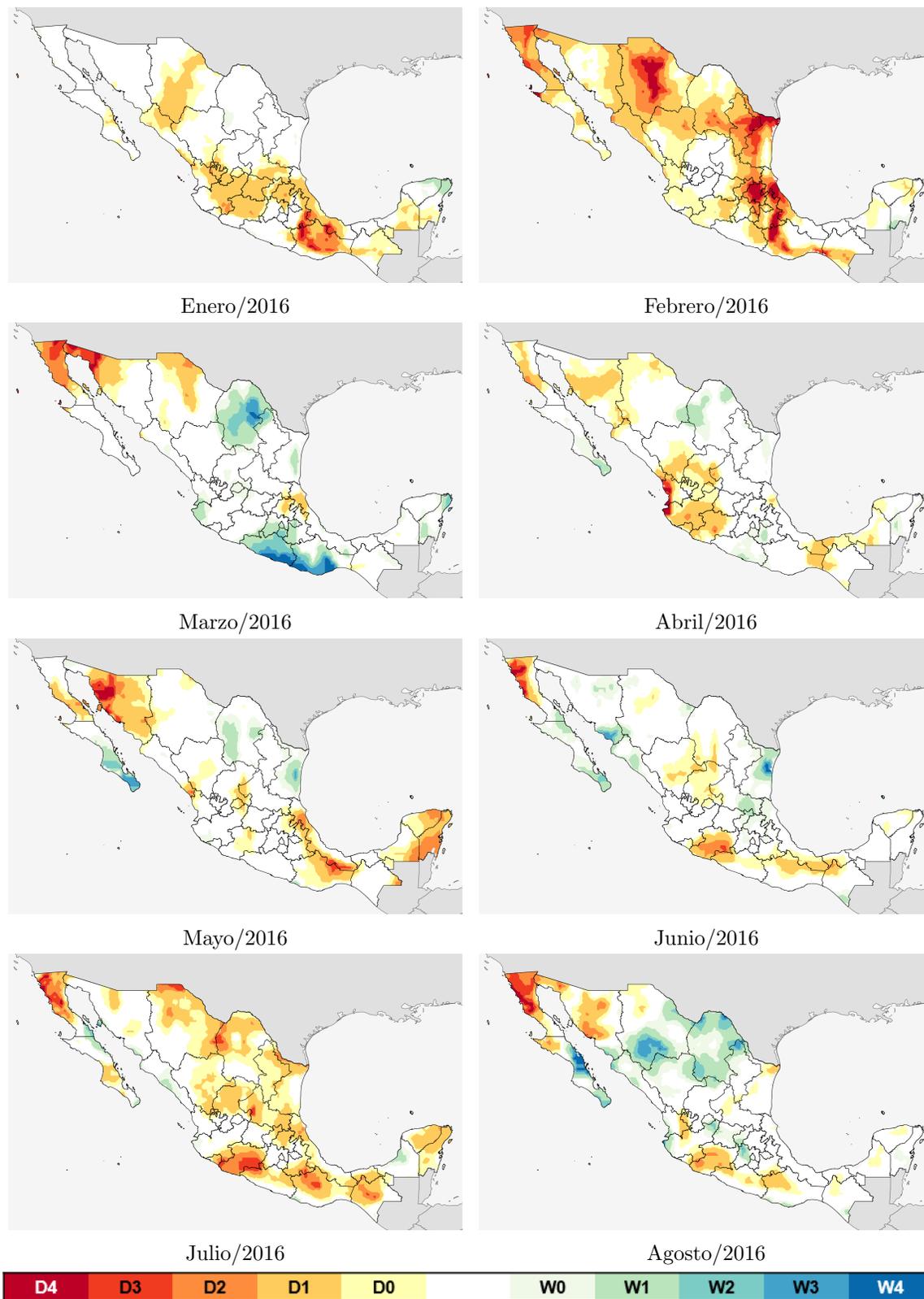


Figura A.9: MSDI-PreSMo<sub>01</sub> en México en el periodo enero-agosto de 2016.

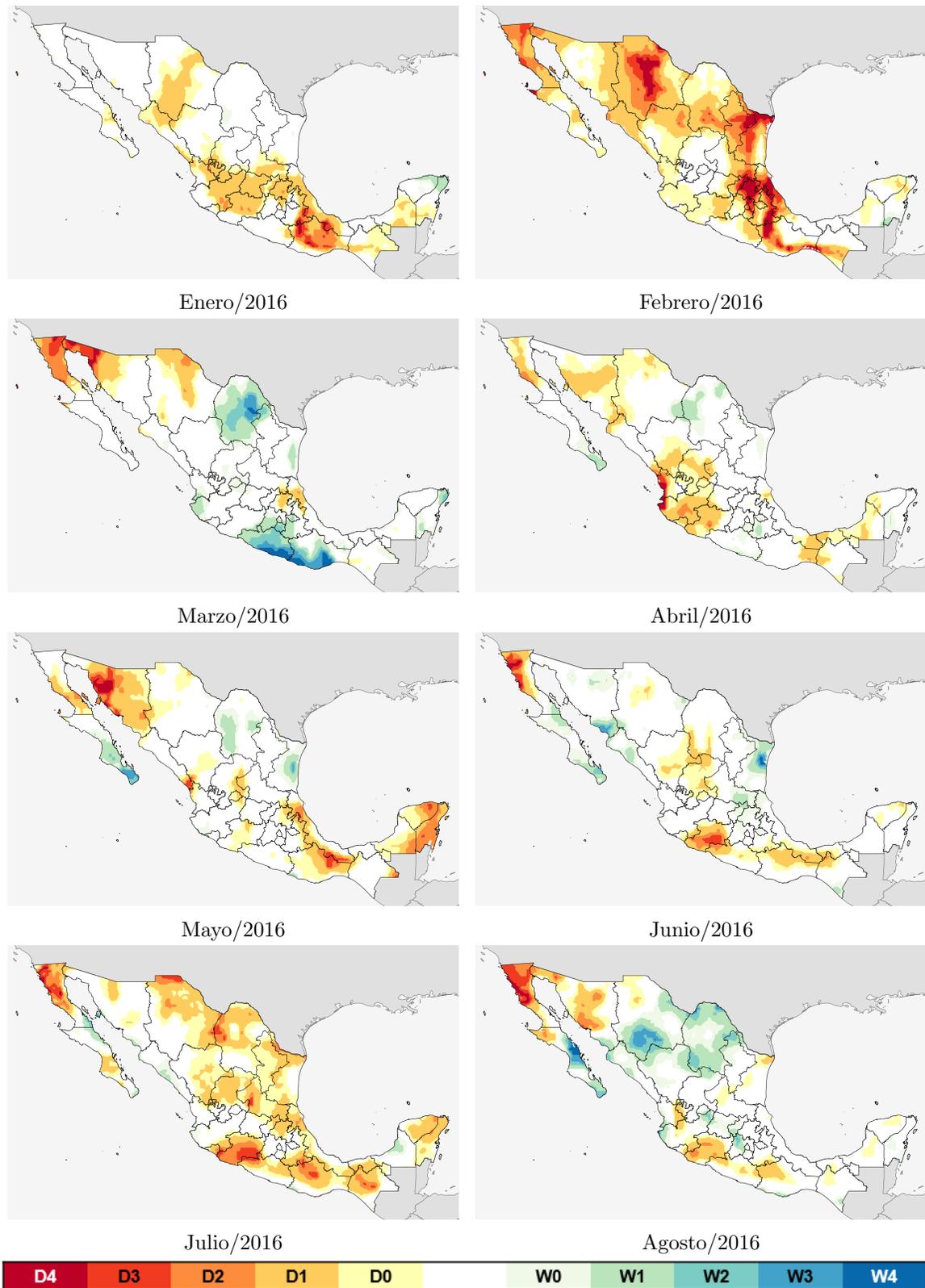


Figura A.10: MSDI-PreSMoRun<sub>01</sub> en México en el periodo enero-agosto de 2016.



## Apéndice B

# Observatorio Mexicano de Sequías

Esta investigación fue desarrollada dentro del marco del Convenio Específico de Colaboración número SGT-GASIR-DF-16-09-RF-CC denominado *Servicio de elaboración de mapas de sequía en México* celebrado entre la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM).

Como parte de este estudio, fue desarrollado un sitio web para la consulta de los resultados de los distintos índices de sequía calculados, cuya dirección electrónica es <http://oh-iiunam.mx/sequia/mapa>. En este sitio es posible consultar y descargar los mapas de intensidad de sequía de todos los periodos mensuales a partir de enero de 1980 hasta el presente en función de los índices estandarizados univariados (*i. e.*, SPI, SSI y SRI) y multivariados (*i. e.*, MSDI-PreRun, MSDI-PreSMo y MSDI-PreSMoRun). Están disponibles los mapas para escalas temporales de análisis de 1, 3, 6, 9, 12 y 24 meses, lo que ayuda a identificar más fácilmente la proporción de los periodos secos. El formato de descarga disponible es KML (Keyhole Markup Language), que puede ser visualizado en la aplicación Google<sup>®</sup> Earth, sin necesidad de una conexión a internet.

Actualmente, los mapas tienen precargada una capa de visualización con los polígonos que definen a los 26 organismos de cuenca, como referencia espacial. Sin embargo, futuras versiones del sitio web podrán incluir otras capas, como, por ejemplo, las regiones y subregiones hidrológicas, regiones hidrológico-administrativas, etc.

La barra lateral del sitio web ofrece menús desplegables para seleccionar entre los distintos filtros disponibles para elegir el mapa de sequía de interés. A continuación se describen las opciones disponibles.

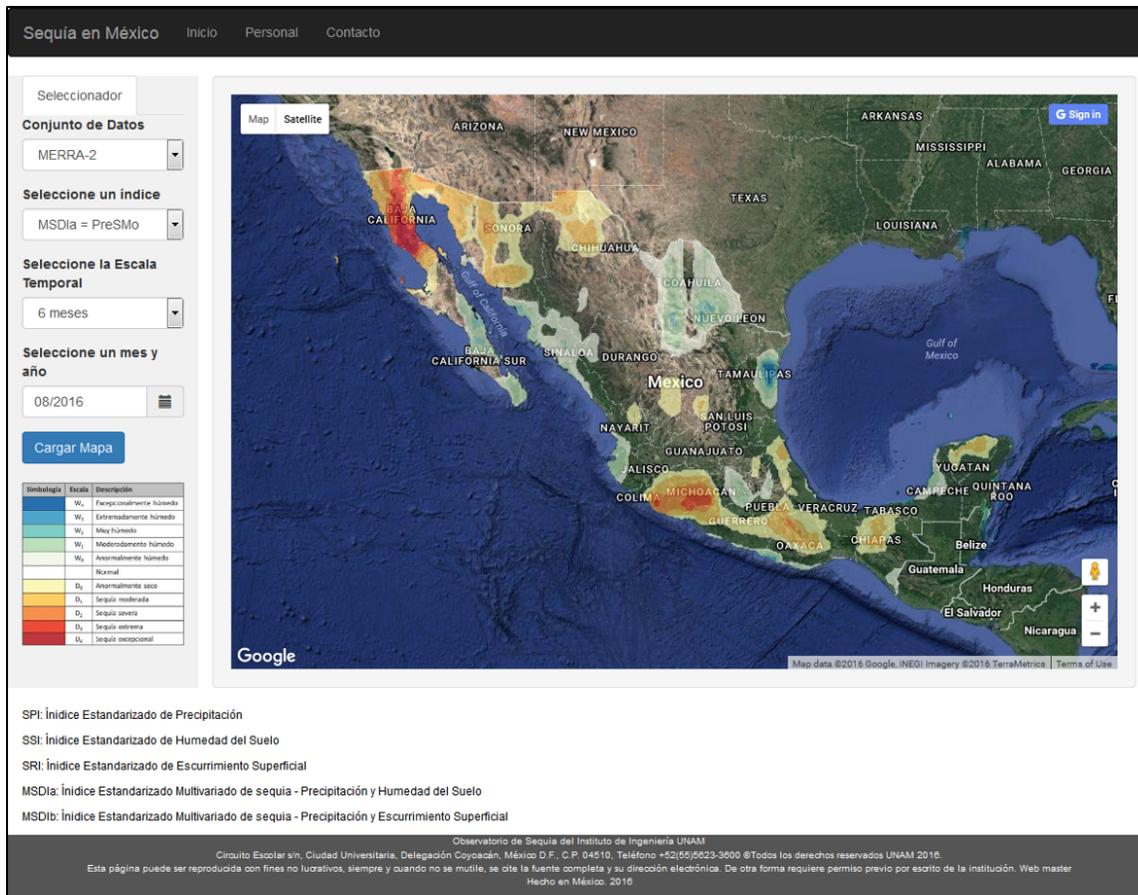


Figura B.1: Interfaz de usuario del sitio web del Observatorio Mexicano de Sequía.

**Conjunto de Datos.** Actualmente, están disponibles los mapas derivados del producto MERRA-2, por ser éste el que mejores métricas de ajuste presenta con respecto a las observaciones directas de precipitación y escurrimiento. Futuras versiones incorporarán resultados de otros productos.

**Seleccione un índice.** Mediante este menú, el usuario define el índice estandarizado de sequía del que desea visualizar el mapa.

**Seleccione la Escala Temporal.** Con ayuda de este menú, se filtran los resultados en función de la escala temporal de cálculo.

**Seleccione un mes y año.** Este menú permite seleccionar, mediante un calendario dinámico, el periodo mensual del que se desea obtener el mapa de sequía.

Una vez definidos todos los filtros, el usuario puede visualizar el mapa en pantalla, haciendo clic izquierdo en el botón “Cargar Mapa” o descargar el archivo KML del mapa haciendo

clic izquierdo en el botón “Descargar Mapa”.



# Bibliografía

- AghaKouchak, Amir (2015). «A multivariate approach for persistence-based drought prediction: Application to the 2010–2011 East Africa drought». En: *Journal of Hydrology* 526, págs. 127-135. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.063.
- AghaKouchak, Amir, Zengchao Hao y Navid Nakhjiri (2013). *Global Integrated Drought Monitoring and Prediction System (GIDMaPS) Documentation*. Inf. téc. University of California, Irvine. DOI: 10.1038/sdata.2014.1.
- AghaKouchak, Amir y Navid Nakhjiri (2012). «A near real-time satellite-based global drought climate data record». En: *Environmental Research Letters* 7, págs. 1-8. DOI: 10.1088/1748-9326/7/4/044037.
- Allen, Richard G., Masahiro Tasumi, Anthony Morse, Ricardo Trezza, James L. Wright, Wim Bastiaanssen, William Kramber, Ignacio Lorite y Clarence W. Robison (2007). «Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Applications». En: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133.4, págs. 395-406. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133.
- AMS (2013). *Drought: An information statement of the American Meteorological Society*. – (2016). *Drought*.
- Anderson, Martha C., Christopher Hain, Brian Wardlow, Agustin Pimstein, John R. Mecikalski y William P. Kustas (2011). «Evaluation of drought indices based on Thermal remote sensing of evapotranspiration over the continental United States». En: *Journal of Climate* 24.8, págs. 2025-2044. DOI: 10.1175/2010JCLI3812.1.
- Angelidis, Panagiotis, Fotios Maris, Nikos Kotsovinos y Vlassios Hrissanthou (2012). «Computation of Drought Index SPI with Alternative Distribution Functions». En: *Water Resources Management* 26.9, págs. 2453-2473. DOI: 10.1007/s11269-012-0026-0.
- Arguez, Anthony y Russell S. Vose (2011). «The definition of the standard WMO climate normal: The key to deriving alternative climate normals». En: *Bulletin of the American Meteorological Society* 92.6, págs. 699-704. DOI: 10.1175/2010BAMS2955.1.

- Avissar, Roni (1992). «Conceptual aspects of a statistical-dynamical approach to represent landscape subgrid-scale heterogeneities in atmospheric models». En: 97.D3, pág. 2729. DOI: 10.1029/91JD01751.
- Bachmair, Sophie, Kerstin Stahl, Kevin Collins, Jamie Hannaford, Mike Acreman, Mark D. Svoboda, Cody Knutson, Kelly Helm Smith, Nicole Wall, Brian Fuchs, Neville D Crossman y Ian C Overton (2016). «Drought indicators revisited: the need for a wider consideration of environment and society». En: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 3.4, págs. 516-536. DOI: 10.1002/wat2.1154.
- Baddour, Omar y Hama Kontongomde, eds. (2007). *The role of climatological normals in a changing climate (WCDMP-No. 61)*. The WCDMP "Guidelines" Series. Geneva: World Meteorological Organization.
- Behrangi, Ali, Eric J Fetzer, Stephanie L Granger, Ali Behrangi, Eric J Fetzer, Stephanie L Granger Early, Ali Behrangi, Eric J Fetzer y Stephanie L Granger (2016). «Early detection of drought onset using near surface temperature and humidity observed from space temperature and humidity observed from space». En: *International Journal of Remote Sensing* 1161.July, págs. 3911-3923. DOI: 10.1080/01431161.2016.1204478.
- Bergman, K. H., P. Sabol y D. Miskus (1988). «Experimental indices for monitoring global drought conditions». En: *Proceedings of 13th Annual Climate Diagnostics Workshop*. Cambridge, MA: United States Department of Commerce.
- Bernhardt, C. E., B. P. Horton y J.-D. Stanley (2012). «Nile Delta vegetation response to Holocene climate variability». En: *Geology* 40.7, págs. 615-618. DOI: 10.1130/G33012.1.
- Beven, Keith (2012). *Rainfall-Runoff modelling: The primer*. 2nd. Wiley-Blackwell. DOI: 10.1002/9781119951001.
- Blauhut, Veit, Kerstin Stahl, James Howard Stagge, Lena M. Tallaksen, Lucia de Stefano y Jürgen V. Vogt (2016). «Estimating drought risk across Europe from reported drought impacts, drought indices, and vulnerability factors». En: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20, págs. 2779-2800. DOI: 10.5194/hess-20-2779-2016.
- Blom, Gunnar (1958). «Statistical estimates and transformed beta-variables». En: *Almquist und Wiksell*, págs. 68-75, 143-146.
- Bohn, Theodore J., Ben Livneh, Jared W. Oyster, Steve W. Running, Bart Nijssen y Dennis P. Lettenmaier (2013). «Global evaluation of MTCLIM and related algorithms for forcing of ecological and hydrological models». En: *Agricultural and Forest Meteorology* 176, págs. 38-49. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.03.003.
- Bonan, Gordon B. (1998). «The land surface climatology of the NCAR land surface model coupled to the NCAR community climate model». En: *Journal of Climate* 11.6, págs. 1307-1326. DOI: 10.1175/1520-0442(1998)011<1307:TLSCOT>2.0.CO;2.
- Bosilovich, Michael G., Robert Lucchesi y Max J. Suarez (2016). *MERRA-2: File Specification. GMAO Office Note No. 9 (Version 1.1)*, pág. 73.

- Bouttier, F. y P. Courtier (2002). *Data assimilation concepts and methods*. Meteorological Training Course Lecture Series. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.
- Bravar, L. y M. L. Kavvas (1991). «On the physics of drought. I. A conceptual framework». En: *Journal of Hydrology* 129, págs. 281-297. DOI: 10.1016/0022-1694(91)90055-M.
- Breña-Naranjo, José Agustín, Miguel Ángel Laverde-Barajas y Adrián Pedrozo-Acuña (2016). «Changes in pan evaporation in Mexico from 1961 to 2010». En: *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.4698.
- Breña-Naranjo, José Agustín, Adrián Pedrozo-Acuña, Óscar Pozos-Estrada, Salma A. Jiménez-López y Marco R. López-López (2015). «The contribution of tropical cyclones to rainfall in Mexico». En: *Physics and Chemistry of the Earth* 83-84, págs. 111-122. DOI: 10.1016/j.pce.2015.05.011.
- Briseño, Patricia (2015). *Sequía pega a 100 municipios de Oaxaca; causa estragos en sembradíos*. Oaxaca, Oax.
- Bryant, Edward (2005). *Natural Hazards*. 2nd ed., pág. 312.
- Buishand, T. A. (1982). «Some methods for testing the homogeneity of rainfall records». En: *Journal of H* 58, págs. 11-27.
- Caballero, José Luis (2012). *México, en el umbral de una sequía histórica*.
- Cashion, James, Venkataraman Lakshmi, David D. Bosch y Thomas J. Jackson (2005). «Microwave remote sensing of soil moisture: Evaluation of the TRMM microwave imager (TMI) satellite for the Little River Watershed Tifton, Georgia». En: *Journal of Hydrology* 307.1-4, págs. 242-253. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.10.019.
- Chang, Fong-Chiau y John M. Wallace (1987). *Meteorological Conditions during Heat Waves and Droughts in the United States Great Plains*. DOI: 10.1175/1520-0493(1987)115<1253:MCDHWA>2.0.CO;2.
- Changnon Jr., Stanley A. (1987). *Detecting drought conditions in Illinois*. Inf. téc. Campaign: Illinois State Water Survey, pág. 36.
- Chen, Fei, Kenneth E. Mitchell, John C. Schaake, Yongkang Xue, Hua-Lu Pan, Victor Koren, Qingyun Duan, Michael Ek y Alan Betts (1996). «Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations». En: *Journal of Geophysical Research* 101.D3, pág. 7251. DOI: 10.1029/95JD02165. arXiv: 01480227.
- Chernoff, H. y S. Zacks (1964). «Estimating the current mean of a normal distribution which is subjected to changes in time». En: *The Annals of Mathematical Statistics* 35, págs. 999-1018.
- CONAGUA (2014). *Política pública nacional para la sequía: Documento rector*. Inf. téc.
- Cook, Benjamin I., Ron L. Miller y Richard Seager (2009). «Amplification of the North American "Dust Bowl" drought through human-induced land degradation.» En: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106.13, págs. 4997-5001. DOI: 10.1073/pnas.0810200106.

- Cook, Edward R., Richard Seager, Mark A. Cane y David W. Stahle (2007). «North American drought: Reconstructions, causes, and consequences». En: *Earth-Science Reviews* 81.1-2, págs. 93-134. DOI: 10.1016/j.earscirev.2006.12.002.
- Corti, T., V. Muccione, P. Köllner-Heck, D. Bresch y Sonia I. Seneviratne (2009). «Simulating past droughts and associated building damages in France». En: *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 6.2, págs. 1463-1487. DOI: 10.5194/hessd-6-1463-2009.
- CRED (2015). *The human cost of weather related disasters: 1995-2015*. The UN Office for Disaster Risk Reduction. DOI: 10.1007/s13398-014-0173-7.2. arXiv: arXiv:1011.1669v3.
- Cunnane, C. (1978). «Unbiased plotting positions - A review». En: *Journal of Hydrology* 37, págs. 205-222. DOI: 10.1016/0022-1694(79)90120-3.
- Dai, Yongjiu y Qingcun Zeng (1997). «A land surface model (IAP94) for climate studies part I: Formulation and validation in off-line experiments». En: *Advances in Atmospheric Sciences* 14.4, págs. 433-460. DOI: 10.1007/s00376-997-0063-4.
- Dai, Yongjiu, Xubin Zeng, Robert E. Dickinson, Ian Baker, Gordon B. Bonan, Michael G. Bosilovich, A. Scott Denning, Paul A. Dirmeyer, Paul R. Houser, Guoyue Niu, Keith W. Oleson, C. Adam Schlosser y Zong Liang Yang (2003). «The Common Land Model». En: *Bulletin of the American Meteorological Society* 84.8, págs. 1013-1023. DOI: 10.1175/BAMS-84-8-1013.
- Damberg, Lisa y Amir AghaKouchak (2014). «Global trends and patterns of drought from space». En: *Theoretical and Applied Climatology* 117.3-4, págs. 441-448. DOI: 10.1007/s00704-013-1019-5.
- De Jesús, Aurea, José Agustín Breña-Naranjo y Adrián Pedrozo-Acuña (2016). «The use of TRMM 3B42 product for drought monitoring in Mexico». En: *Water* 8, págs. 1-23. DOI: 10.3390/w8080325.
- De Roo, A. P. J., C. G. Wesseling y W. P. A. van Deursen (2000). «Physically based river basin modelling within a GIS: the LISFLOOD model». En: *Hydrological Processes* 14.11-12, págs. 1981-1992. DOI: 10.1002/1099-1085(20000815/30)14:11/12<1981::AID-HYP49>3.0.CO;2-F.
- Dickinson, Robert E., A. Henderson-Sellers, P. J. Kennedy y M. F. Wilson (1986). «Biosphere-Atmosphere Transfer scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model». En: *Tech Note NCAR/RN-275+STR, National Centre for Atmospheric Resource Boulder CO* 69 pp December.
- DOF 31/01/2011 (s.f.). *Anexos de los Lineamientos de Operación Específicos del Fondo de Desastres Naturales*.
- Domínguez Mora, Ramón, Óscar Arturo Fuentes Mariles, Moisés Berezowsky Verduzco, Eliseo Carrizosa E., Guadalupe E. Fuentes Mariles, Javier Osnaya R., Abel Jiménez C., Faustino de la Luna C. y Baldemar Méndez A. (2003). *Normatividad interna para determinar de forma racional y congruente los periodos de retorno que deben cumplirse*

- en el diseño de obras de almacenamiento, control y protección*. Inf. téc. México, D. F.: Instituto de Ingeniería UNAM.
- Dracup, John A., Kil Seong Lee y Edwin G. Paulson Jr. (1980). «On the definition of droughts». En: *Water Resources Research* 16.2, págs. 297-302. DOI: 10.1029/WR016i002p00297.
- Easterling, David R., J. L. Evans, P. Ya. Groisman, T. R. Karl, K. E. Kunkel y P. Ambenje (2000). «Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review». En: *Bulletin of the American Meteorological Society* 81.March, págs. 417-425. DOI: 10.1175/1520-0477.
- Edwards, Daniel C. y Thomas B. McKee (1997). «Characteristics of 20th Century drought in the United States at multiple time scales.» En: *Atmospheric Science Paper No. 634, May 1–30*, pág. 174.
- EFE (2016). *Templo del siglo XVI emerge del agua en Oaxaca*.
- Entekhabi, D., E. Njoku, Paul R. Houser, M. Spencer, T. Doiron, J. Smith, R. Girard, S. Belair, Thomas J. Jackson, Y. Kerr, John S. Kimball, Randal D. Koster, Kyle C. McDonald, P. O. Neill, T. Pultz, Steve W. Running, J. C. Shi, Eric F. Wood y J. van Zyl (2004). «The Hydrosphere State (HYDROS) Mission concept : An earth system pathfinder for global mapping of soil moisture and land freeze/thaw». En: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42.10, págs. 1-11.
- Farahmand, Alireza y Amir AghaKouchak (2015). «A generalized framework for deriving nonparametric standardized drought indicators». En: *Advances in Water Resources* 76, págs. 140-145. DOI: 10.1016/j.advwatres.2014.11.012.
- Gibbs, W. J. (1975). «Drought—Its definition, delineation, and effects». En: *26th Session of the WMO Executive Committee, Special Environment Report No. 5*. Geneva.
- Gibbs, W. J. y J. V. Maher (1967). «Rainfall deciles as drought indicators». En: *Australian Bureau of Meteorology Bulletin* 48, pág. 37.
- Giner, Rafael Armando, Luis Carlos Fierro y Luis Fernando Negrete (2012). *Análisis de la problemática de la sequía 2011-2012 y sus efectos en la ganadería y la agricultura de temporal*. Inf. téc. Saltillo, Coah.: Comisión Nacional de las Zonas Áridas.
- Glantz, Michael H. (2003). *Climate affairs: A primer*. Washington, D. C.: Island Press.
- Gobron, N., B. Pinty, F. Mélin, M. Taberner, M. M. Verstraete, A. Belward, T. Lavergne y J.-L. Widlowski (2005). «The state of vegetation in Europe following the 2003 drought». En: *International Journal of Remote Sensing* 26.9, págs. 2013-2020. DOI: 10.1080/01431160412331330293.
- Gringorten, Irving I. (1963). «A plotting rule for extreme probability paper». En: *Journal of Geophysical Research* 68.3, pág. 813. DOI: 10.1029/JZ068i003p00813.
- Guerrero Salazar, P. y V. Yevjevich (1975). *Analysis of drought characteristics by the theory of runs*. Hydrology Paper No. 80. Fort Collins, CO: Department of Civil Engineering, Colorado State Univ.

- Guha-Sapir, Debby, Regina Below y Ph. Hoyois (2016). *EM-DAT: The CRED/OFDA International Disaster Database*. Brussels.
- Guha-Sapir, Debby, Femke Vos, Regina Below y Sylvain Ponsérre (2011). *Annual disaster statistical review 2010: The numbers and trends*. Brussels.
- Guttman, Nathaniel B. (1999). «Accepting the Standardized Precipitation Index: a Calculation Algorithm1». En: *Journal of the American Water Resources Association* 35.2, págs. 311-322. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x.
- Hao, Zengchao y Amir AghaKouchak (2013). «Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model». En: *Advances in Water Resources* 57, págs. 12-18. DOI: 10.1016/j.advwatres.2013.03.009.
- (2014). «A Nonparametric Multivariate Multi-Index Drought Monitoring Framework». En: *Journal of Hydrometeorology* 15.1, págs. 89-101. DOI: 10.1175/JHM-D-12-0160.1.
- Hao, Zengchao, Amir AghaKouchak, Navid Nakhjiri y Alireza Farahmand (2014). «Global integrated drought monitoring and prediction system». En: *Scientific Data* 1, págs. 1-10. DOI: 10.1038/sdata.2014.1.
- Hao, Zengchao y Vijay P. Singh (2015). «Drought characterization from a multivariate perspective: A review». En: *Journal of Hydrology* 527, págs. 668-678. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.05.031.
- Hazen, Allen (1913). «Storage to be provided impounding reservoirs for municipal water supply». En: *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 39.9, págs. 1943-2044.
- Helsel, Dennis R. y Robert M. Hirsch (2002). *Statistical methods in water resources*. Techniques of Water Resources Investigations. U.S. Geological Survey. DOI: 10.2307/1269385.
- Hernández-Mora, Nuria, Mariana Gil, Alberto Garrido y Roberto Rodríguez-Casado (2013). *La sequía 2005-2008 en la cuenca del Ebro: Vulnerabilidad, impactos y medidas de gestión*. January. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid - Centro de Estudios e Investigación para la Gestión de Riesgos Agrarios y Medioambientales.
- Hirabayashi, Yukiko, Shinjiro Kanae, Seita Emori, Taikan Oki y Masahide Kimoto (2008). «Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate». En: *Hydrological Sciences Journal* 53.4, págs. 754-772. DOI: 10.1623/hysj.53.4.754.
- Hisdal, H. y L.M. Tallaksen, eds. (2000). *Drought event definition*. Technical Report to the ARIDE project 6. Oslo: Department of Geophysics, University of Oslo, pág. 41.
- Houser, Paul R., Gabriëlle J. M. de Lannoy y Jeffrey P. Walker (2012). «Hydrologic Data Assimilation». En: *Approaches to Managing Disaster - Assessing Hazards, Emergencies and Disaster Impacts*. Ed. por John Tiefenbacher. InTech. Cap. 3, págs. 41-64. DOI: 10.5772/31246.
- Huang, Jin, Huug M. van den Dool y Konstantine P. Georgakakos (1996). «Analysis of model-calculated soil moisture over the United States (1931-1993) and applications to

- long-range temperature forecasts». En: *Journal of Climate* 9.6, págs. 1350-1362. DOI: 10.1175/1520-0442(1996)009<1350:AOMCSM>2.0.CO;2.
- Huang, Shengzhi, Qiang Huang, Guoyong Leng y Saiyan Liu (2016). «A nonparametric multivariate standardized drought index for characterizing socioeconomic drought: A case study in the Heihe River Basin». En: *Journal of Hydrology*. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.09.059.
- Huffman, George J., David T. Bolvin, Eric J. Nelkin, David B. Wolff, Robert F. Adler, Guojun Gu, Yang Hong, Kenneth P. Bowman y Erich F. Stocker (2007). «The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales». En: *Journal of Hydrometeorology* 8.1, págs. 38-55. DOI: 10.1175/JHM560.1.
- IPCC (2007). *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ed. por S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor y H. L. Miller. 9. Cambridge, United Kingdom y New York, NY, USA: Cambridge University Press, pág. 996. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004. arXiv: arXiv:1011.1669v3.
- Ji, Lei y Albert J. Peters (2003). «Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices». En: *Remote Sensing of Environment* 87.1, págs. 85-98. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00174-3.
- Jones, Matthew O., John S. Kimball, Lucas A. Jones y Kyle C. McDonald (2012). «Satellite passive microwave detection of North America start of season». En: *Remote Sensing of Environment* 123, págs. 324-333. DOI: 10.1016/j.rse.2012.03.025.
- Kao, Shih Chieh y Rao S. Govindaraju (2010). «A copula-based joint deficit index for droughts». En: *Journal of Hydrology* 380.1-2, págs. 121-134. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.10.029.
- Katz, R. W. y B. G. Brown (1992). «Extreme events in changing climate variability is more important than average». En: *Climatic Change* 21.3, in. DOI: 10.1007/BF00139728.
- Keetch, John J. y George M. Byram (1968). *A drought index for forest fire control*. Inf. téc. Ashville, NC: US Department of Agriculture - Forest Service, pág. 35. DOI: 10.1016/j.accpm.2015.04.007.
- Keyantash, John y John A. Dracup (2002). «The quantification of drought: An evaluation of drought indices». En: *Bulletin of the American Meteorological Society* 83.8, págs. 1167-1180. DOI: 10.-0477.
- Kinninmonth, W. R., M. E. Voice, G. S. Beard, G. C. de Hoedt y C. E. Mullen (2000). «Australian climate services for drought management». En: *Drought: A global assessment*. Ed. por Donald A. Wilhite. Routledge, págs. 210-222.

- Kogan, Felix N. (1995). «Droughts of the Late 1980s in the United States as Derived from NOAA Polar-Orbiting Satellite Data». En: *Bulletin of the American Meteorological Society* 76.5, págs. 655-668. DOI: 10.1175/1520-0477(1995)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2.
- Koster, Randal D. y Max J. Suarez (1992). «Modeling the land surface boundary in climate models as a composite of independent vegetation stands». En: 97, págs. 2697-2715. DOI: 10.1029/91JD01696.
- (1996). *Energy and water balance calculations in the Mosaic LSM*. Ed. por Max J. Suarez. Vol. 9. Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation. Greenbelt, Maryland: Goddard Space Flight Center, pág. 69.
- Koster, Randal D., Max J. Suarez, Agnès Ducharne, Marc Stieglitz y Praveen Kumar (2000). «A catchment-based approach to modeling land surface processes in a general circulation model 1. Model structure». En: *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 105.D20, págs. 24809-24822. DOI: 10.1029/2000jd900327.
- Kulik, M. S. (1962). «Agroclimatic indices of drought». En: *Compendium of Abridged Reports to the Second Session of CAgM (WMO)*. Ed. por F.F. Davidaya y M.S. Kulik. Moscow: Hydrometeorological Publishing, págs. 75-81.
- Kumar, S. V., C. D. Peters-Lidard, Y. Tian, Paul R. Houser, J. Geiger, S. Olden, L. Lighty, J. L. Eastman, B. Doty, Paul A. Dirmeyer, J. Adams, Kenneth E. Mitchell, Eric F. Wood y Justin Sheffield (2006). «Land information system: An interoperable framework for high resolution land surface modeling». En: *Environmental Modelling and Software* 21.10, págs. 1402-1415. DOI: 10.1016/j.envsoft.2005.07.004.
- Lawrimore, Jay, Richard R. Heim Jr., Mark D. Svoboda, Val Swail y Phil J. Enghelhart (2002). «Beginning a new era of drought monitoring across North America». En: *Bulletin of the American Meteorological Society* 83.8, págs. 1191-1192. DOI: 10.1175/1520-0477(2002)083<1191:BANEOD>2.3.CO;2.
- Liang, Xu, Dennis P. Lettenmaier, Eric F. Wood y Stephen J. Burges (1994). «A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models». En: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 99.D7, págs. 14415-14428. DOI: 10.1029/94JD00483.
- Liang, Xu, Eric F. Wood y Dennis P. Lettenmaier (1996). «Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modification». En: *Global and Planetary Change* 13.1-4, págs. 195-206. DOI: 10.1016/0921-8181(95)00046-1.
- Lyon, Bradfield, Michael A. Bell, Michael K. Tippett, Arun Kumar, Martin P. Hoerling, Xiao Wei Quan y Hui Wang (2012). «Baseline probabilities for the seasonal prediction of meteorological drought». En: *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51.7, págs. 1222-1237. DOI: 10.1175/JAMC-D-11-0132.1.
- Machiwal, Deepesh y Madan Kumar Jha (2012). *Hydrologic time series analysis: Theory and practice*. New Delhi: Springer.

- Maestre, Fernando T., Roberto Salguero-Gómez y José L. Quero (2012). «It is getting hotter in here: determining and projecting the impacts of global environmental change on drylands». En: *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* 367.1606, págs. 3062-75. DOI: 10.1098/rstb.2011.0323.
- Maracchi, G. (2000). «Agricultural drought: A practical approach to definition, assessment and mitigation strategies». En: *Drought and drought mitigation in Europe*. Ed. por Jürgen V. Vogt y Francesca Somma. Springer-Science+Business Media, B. V. Cap. 2: Drought, págs. 63-75.
- Mawdsley, J., G. Petts y S. Walker (1994). «Assessment of drought severity». En: *British Hydrological Society Occasional Paper* 3.
- McKee, Thomas B., Nolan J. Doesken y John Kleist (1993). «The relationship of drought frequency and duration to time scales». En: *Eighth Conference on Applied Climatology*. Anaheim, California: American Meteorological Society, págs. 179-184.
- Méndez Pérez, Juan Matías y Víctor Magaña (2010). «Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and central America». En: *Journal of Climate* 23.5, págs. 1175-1188. DOI: 10.1175/2009JCLI3080.1.
- Miranda Alonso, Saúl, Víctor Benítez Pensado y Rodrigo H. Flores Zamudio (2006). «Una herramienta para el manejo de los datos climatológicos del país». En: *V Congreso Internacional y XI Nacional de Ciencias Ambientales*. Morelos: Asociación Nacional de Ciencias Ambientales.
- Mishra, Ashok K. y Vijay P. Singh (2010). «A review of drought concepts». En: *Journal of Hydrology* 391.1-2, págs. 202-216. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.012.
- Mitchell, Kenneth E., Dag Lohmann, Paul R. Houser, Eric F. Wood, John C. Schaake, Alan Robock, Brian A. Cosgrove, Justin Sheffield, Qingyun Duan, Lifeng Luo, R. Wayne Higgins, Rachel T. Pinker, J. Dan Tarpley, Dennis P. Lettenmaier, Curtis H. Marshall, Jared K. Entin, Ming Pan, Wei Shi, Victor Koren, Jesse Meng, Bruce H. Ramsay y Andrew A. Bailey (2004). «The multi-institution North American Land Data Assimilation System (NLDAS): Utilizing multiple GCIP products and partners in a continental distributed hydrological modeling system». En: *Journal of Geophysical Research* 109, págs. 1-32. DOI: 10.1029/2003JD003823.
- Mo, Kingtse C. (2011). «Drought onset and recovery over the United States». En: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116.20, págs. 1-14. DOI: 10.1029/2011JD016168.
- Montgomery, Douglas C. y George C. Runger (2003). *Applied Statistics and Probability for Engineers*. John Wiley & Sons, Inc.
- Moriassi, D. N., J. G. Arnold, M. W. van Liew, R. L. Binger, R. D. Harmel y T. L. Veith (2007). «Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations». En: *Transactions of the ASABE* 50.3, págs. 885-900. DOI: 10.13031/2013.23153. arXiv: 00012351.

- Ndehedehe, Christopher E., Joseph L. Awange, Robert J. Corner, Michael Kuhn y Onuwa Okwuashi (2016). «On the potentials of multiple climate variables in assessing the spatio-temporal characteristics of hydrological droughts over the Volta Basin». En: *Science of the Total Environment* 557-558, págs. 819-837. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.004.
- NDMC (2016). *Interpretation of Standardized Precipitation Index Maps*.
- Neal, Brad y R. Moran (2009). «Droughts and drought mitigation in water resources planning». En: *Australian Journal of Water Resources* 13.2, págs. 145-152. DOI: 10.1080/13241583.2009.11465369.
- Niemeyer, S. (2008). «New drought indices». En: *Drought management: Scientific and technological innovations*. Ed. por A. López-Francos. Vol. 80. Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 80 80. Zaragoza: CIHEAM, págs. 267-274. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004. arXiv: arXiv:1011.1669v3.
- NRCS ENTSC (2011). *Soil Quality for Environmental Health*.
- Oglesby, Robert J. y David J. Erickson III (1989). «Soil moisture and the persistence of north american drought». En: *Journal of Climate* 2.11, págs. 1362-1380. DOI: 10.1175/1520-0442(1989)002<1362:smatpo>2.0.co;2.
- Palmer, Wayne C. (1965). *Meteorological drought*. Inf. téc. Washington, D.C.: U.S. Department of Commerce/Weather Bureau, pág. 58.
- (1968). «Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index». En: *Weatherwise* 21, págs. 156-161.
- Quiring, Steven M. (2009). «Developing objective operational definitions for monitoring drought». En: *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48.6, págs. 1217-1229. DOI: 10.1175/2009JAMC2088.1.
- Rakhecha, Pukh Raj y Vijay P. Singh (2009). *Applied Hydrometeorology*. DOI: 10.1007/978-1-4020-9844-4.
- Reichle, Rolf H., Randal D. Koster, Gabriëlle J. M. de Lannoy, Barton A. Forman, Qing Liu, Sarith P. P. Mahanama y Ally Toure (2011). «Assessment and enhancement of MERRA land surface hydrology estimates». En: *Journal of Climate* 24.24, págs. 6322-6338. DOI: 10.1175/JCLI-D-10-05033.1.
- Reyes Chávez, Lilia (2001). «Análisis regional de sequías». Tesis doct. Universidad Nacional Autónoma de México, págs. xi, 206.
- Reynolds, C. A., Thomas J. Jackson y W. J. Rawls (2000). «Estimating soil water-holding capacities by linking the Food and Agriculture Organization soil map of the world with global pedon databases and continuous pedotransfer functions». En: *Water Resources Research* 36.12, págs. 3653-3662. DOI: 10.1029/2000WR900130.
- Richardson, B. Gill (2009). *Las grandes sequías mayas: Agua, vida y muerte*. México, D. F.: Fondo de Cultura Económica, pág. 561.

- Rienecker, Michele M., Max J. Suarez, Ronald Gelaro, Ricardo Todling, Julio T. Bacmeister, Emily Liu, Michael G. Bosilovich, Siegfried D. Schubert, Lawrence Takacs, Gi Kong Kim, Stephen Bloom, Junye Chen, Douglas Collins, Austin Conaty, Arlindo Da Silva, Wei Gu, Joanna Joiner, Randal D. Koster, Robert Lucchesi, Andrea Molod, Tommy Owens, Steven Pawson, Philip J. Pegion, Christopher R. Redder, Rolf H. Reichle, Franklin R. Robertson, Albert G. Ruddick, Meta Sienkiewicz y Jack Woollen (2011). «MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications». En: *Journal of Climate* 24.14, págs. 3624-3648. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00015.1.
- Rodell, Matthew y James S. Famiglietti (2002). «The potential for satellite-based monitoring of groundwater storage changes using GRACE: The High Plains aquifer, Central US». En: *Journal of Hydrology* 263.1-4, págs. 245-256. DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00060-4.
- Rodell, Matthew, Paul R. Houser, U. Jambor, Jon Gottschalck, Kenneth E. Mitchell, C.-J. Meng, K. Arsenault, Brian A. Cosgrove, J. Radakovich, Michael G. Bosilovich, Jared K. Entin, Jeffrey P. Walker, Dag Lohmann y D. Toll (2004). «The Global Land Data Assimilation System». En: *Bulletin of the American Meteorological Society* 85.3, págs. 381-394. DOI: 10.1175/BAMS-85-3-381.
- Rodríguez Licea, Gabriela y Christian Juárez Carrillo (2011). «Impacto de la sequía sobre los mercados agropecuarios en México (2011)». En: *Economía Actual* IV.4, págs. 26-29.
- Rossi, Giuseppe y Antonino Cancelliere (2013). «Managing drought risk in water supply systems in Europe: a review». En: *International Journal of Water Resources Development* 29.2, págs. 272-289. DOI: 10.1080/07900627.2012.713848.
- SAGARPA (2013). *Declaratoria de Desastre Natural en el sector agropecuario, acuícola y pesquero, a consecuencia de la sequía y en virtud de los daños ocasionados por dicho fenómeno que afectó a los municipios de Canatlán, Canelas, Coneto de Comonfort, Cuencamé, Durango*.
- Saha, Suranjana, Shrinivas Moorthi, Xingren Wu, Jiande Wang, Sudhir Nadiga, Patrick Tripp, David Behringer, Yu Tai Hou, Hui Ya Chuang, Mark Iredell, Michael Ek, Jesse Meng, Rongqian Yang, Malaquíás Méndez Peña, Huug M. van den Dool, Qin Zhang, Wanqiu Wang, Mingyue Chen y Emily Becker (2014). «The NCEP climate forecast system version 2». En: *Journal of Climate* 27.6, págs. 2185-2208. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.
- Salas, José (1993). «Analysis and modeling of hydrologic time series». En: *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill, págs. 19.2-19.63.
- Sandford, S. (1979). «Towards a definition of drought». En: *Botswana Drought Symposium*. Ed. por M. T. Hinchey. Gaborone: Botswana Society.
- Sayers, Paul, Catherine Moncrieff, Dave Tickner, Robert Speed, Lei Gang, Wei Yu, Li Yuanyuan, Li Jianqiang, Xu Xiangyu, Li Aihua y Guy Pegram (2016). *Drought risk management: A strategic approach*. September. Paris: UNESCO.

- Schubert, Siegfried D., Max J. Suarez, Philip J. Pegion, Randal D. Koster y Julio T. Bacmeister (2004). «On the cause of the 1930s Dust Bowl». En: *Science* 303.5665, págs. 1855-1859. DOI: 10.1126/science.1095048.
- Sellers, P. J., J. A. Berry, G. J. Collatz, C. B. Field y F. G. Hall (1992). «Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integrated scheme». En: *Remote Sensing of Environment* 42, págs. 187-216.
- Seneviratne, Sonia I., Neville Nicholls, David R. Easterling, Clare M. Goodess, Shinjiro Kanae, James Kossin, Yali Luo, Jose Marengo, Kathleen McInnes, Mohammad Rahimi, Markus Reichstein, Asgeir Sorteberg, Carolina Vera y Xuebin Zhang (2012). «Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment». En: *Managing the Risk of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Ed. por C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G. -K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor y P. M. Midgley. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge, UK y New York, NY, USA: Cambridge University Press, págs. 109-230.
- Sepulcre-Canto, G., S. Horion, A. Singleton, H. Carrao y Jürgen V. Vogt (2012). «Development of a combined drought indicator to detect agricultural drought in Europe». En: *Natural Hazards and Earth System Science* 12.11, págs. 3519-3531. DOI: 10.5194/nhess-12-3519-2012.
- Shafer, B. A. y L. E. Dezman (1982). *Development of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas*.
- Sheffield, Justin, Gopi Goteti y Eric F. Wood (2006). «Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling». En: *Journal of Climate* 19.13, págs. 3088-3111. DOI: 10.1175/JCLI3790.1.
- Sheffield, Justin, Eric F. Wood, Nathaniel Chaney, Kaiyu Guan, Sara Sadri, Xing Yuan, Luke Olang, Abou Amani, Abdou Ali, Siegfried Demuth y Laban Ogallo (2014). «A drought monitoring and forecasting system for sub-Saharan African water resources and food security». En: *Bulletin of the American Meteorological Society* 95.6, págs. 861-882. DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00124.1.
- Shukla, Shraddhanand y Andrew W. Wood (2008). «Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought». En: *Geophysical Research Letters* 35.2, págs. 1-7. DOI: 10.1029/2007GL032487.
- Solís-Alvarado, Y., H. Sanvicente-Sánchez, J. García-Hernández, G. Martínez-Castillo y R. Mendoza-Betanzos (2015). «Location and search via the web of hydrometric information of the Mexican National Hydrometric Network». En: *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. Vol. 200. WIT Press, págs. 79-87. DOI: 10.2495/WS150071.

- Sorooshian, Soroosh, Amir Aghakouchak, Phillip Arkin, John Eylander, Efi Foufoula-Georgiou, Russell Harmon, Jan M. H. Hendrickx, Bisher Imam, Robert Kuligowski, Brian Skahill y Gail Skofronick-Jackson (2011). «Advanced concepts on remote sensing of precipitation at multiple scales». En: *Bulletin of the American Meteorological Society* 92.10, págs. 1353-1357. DOI: 10.1175/2011BAMS3158.1.
- Stahl, Kerstin, Irene Kohn, Veit Blauhut, Julia Urquijo, Lucia de Stefano, Vanda Acácio, Susana Dias, James Howard Stagge, Lena M. Tallaksen, Eleni Kampragou, Anne F. van Loon, Lucy J. Barker, Lieke A. Melsen, Carlo Bifulco, Dario Musolino, Alessandro de Carli, Antonio Massarutto, Dionysis Assimacopoulos y Henny A. J. van Lanen (2016). «Impacts of European drought events: Insights from an international database of text-based reports». En: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16.3, págs. 801-819. DOI: 10.5194/nhess-16-801-2016.
- Stahle, David W., Falko K. Fye, Edward R. Cook y R. Daniel Griffin (2007). «Tree-ring reconstructed megadroughts over North America since A.D. 1300». En: *Climatic Change* 83.1-2, págs. 133-149. DOI: 10.1007/s10584-006-9171-x.
- Subrahmanyam, V. P. (1967). *Incidence and spread of continental drought (Report No. 2)*. Inf. téc. Geneva: WMO/IHD.
- Svoboda, Mark D., Doug LeComte, Michael J. Hayes, Richard Heim, Karin Gleason, James R. Angel, Brad Rippey, Rich Tinker, Mike Palecki, David Stooksbury, David Miskus y Scott Stephens (2002). «Drought Monitor». En: *Bulletin of the American Meteorological Society* April, págs. 1181-1190. DOI: 10.1175/1520-0477(2002)083(1181:TDM)2.3.CO;2.
- Tate, E. L. y A. Gustard (2000). «Drought definition: A hydrological perspective». En: *Drought and drought mitigation in Europe*. Ed. por Jürgen V. Vogt y Francesca Somma. Springer-Science+Business Media, B. V., págs. 23-48. DOI: 10.1007/978-94-015-9472-1.
- Travis, William R. y Roberta A. Klein (2012). *Socioeconomic impacts and adaptation strategies: Assessing research on quantification of drought impacts*. Inf. téc. Boulder: Western Water Assessment, pág. 11.
- Tsakiris, G., A. Loukas, D. Pangalou, H. Vangelis, D. Tigkas, Giuseppe Rossi y Antonino Cancelliere (2007). «Drought characterization [Part 1. Components of drought planning. 1.3. Methodological component]». En: *Drought management guidelines technical annex*. Ed. por A. Iglesias, M. Moneo y A. López-Francos. Vol. 58. Options Méditerranéennes: Série B. Etudes et Recherches; n. 58 58. Zaragoza: CIHEAM / EC MEDA Water, págs. 85-102.
- Turnbull, Bruce W. (1976). «The empirical distribution function with arbitrarily grouped, censored and truncated data». En: *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 38.3, págs. 290-295.
- UNISDR (2015). «Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030». En: *Resolución aprobada por la Asamblea General el 3 de junio de 2015*, pág. 26.

- Van der Molen, M. K., A. J. Dolman, P. Ciais, T. Eglin, N. Gobron, B. E. Law, P. Meir, W. Peters, O. L. Phillips, Markus Reichstein, T. Chen, S. C. Dekker, M. Doubková, M. A. Friedl, M. Jung, B. J. J. M. van den Hurk, R. A. M. de Jeu, B. Kruijt, T. Ohta, K. T. Rebel, S. Plummer, Sonia I. Seneviratne, S. Sitch, Adriaan J. Teuling, G. R. van der Werf y G. Wang (2011). «Drought and ecosystem carbon cycling». En: *Agricultural and Forest Meteorology* 151.7, págs. 765-773. DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.01.018.
- Van Lanen, Henny A. J. y E. Peters (2000). «Definition, Effects and Assessment of Groundwater Droughts». En: *Drought and Drought Mitigation in Europe*, págs. 49-61. DOI: 10.1007/978-94-015-9472-1\_4.
- Van Loon, Anne F. (2015). «Hydrological drought explained». En: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 2.4, págs. 359-392. DOI: 10.1002/wat2.1085.
- Van Loon, Anne F., Tom Gleeson, Julian Clark, Albert I. J. M. van Dijk, Kerstin Stahl, Jamie Hannaford, Giuliano di Baldassarre, Adriaan J. Teuling, Lena M. Tallaksen, Remko Uijlenhoet, David M. Hannah, Justin Sheffield, Mark D. Svoboda, Boud Verbeiren, Thorsten Wagener, Sally Rangecroft, Niko Wanders y Henny A. J. van Lanen (2016). «Drought in the Anthropocene». En: *Nature Geoscience* 9.2, págs. 89-91. DOI: 10.1038/ngeo2646.
- Van Loon, Anne F., S. W. Ploum, J. Parajka, A. K. Fleig, E. Garnier, G. Laaha y Henny A. J. van Lanen (2014). «Hydrological drought typology: temperature-related drought types and associated societal impacts». En: *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 11.9, págs. 10465-10514. DOI: 10.5194/hessd-11-10465-2014.
- Van Loon, Anne F. y Henny A. J. van Lanen (2012). «A process-based typology of hydrological drought». En: *Hydrology and Earth System Sciences* 16.7, págs. 1915-1946. DOI: 10.5194/hess-16-1915-2012.
- (2013). «Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework». En: *Water Resources Research* 49.3, págs. 1483-1502. DOI: 10.1002/wrcr.20147.
- Vargas, Martín (2016). *Sequía extrema en Oaxaca*. Ciudad Ixtepec, Oax.
- Verdin, K. L. y S. K. Greenlee (1996). «Development of continental scale digital elevation models and extraction of hydrographic features». En: *Proc. Third Int. Conf./ Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*. Santa Fe, NM: National Center for Geographic Information y Analysis.
- Von Neumann, John (1941). «Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance». En: *Annals of Mathematical Statistics* 12, págs. 367-395.
- Wanders, Niko, Henny A. J. van Lanen y Anne F. van Loon (2010). *WATCH Technical Report No. 24: Indicators for drought characterization on a global scale*. Inf. téc. 24, pág. 93.
- Weibull, Ernst Hjalmar Waloddi (1939). *The Phenomenon of Rupture in Solids*. Stockholm.

- Weiss, Barry (1982). «Egypt remained a strong power well into the second half of the thirteenth century B . C .» En: *Climate Change* 4, págs. 173-198.
- Wilhite, Donald A. (2000). «Drought as a natural hazard: Concepts and definitions». En: *Drought: A global assessment*. London: Routledge Publishers. Cap. Chapter 1, págs. 3-18.
- ed. (2005). *Drought and water crises: Science, technology, and management issues*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- (2007). «Drought». En: *International perspectives on natural disasters: Occurrence, mitigation, and consequences*. Ed. por Joseph P. Stoltman, John Lidstone y Lisa M. DeChano. Advances in Natural and Technological Hazards Research. Springer Netherlands. Cap. 7, págs. 147-162. DOI: 10.1007/978-1-4020-2851-9.
- Wilhite, Donald A. y Michael H. Glantz (1985). «Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions». En: *Water International* 10.3, págs. 111-120. DOI: 10.1080/02508068508686328.
- Willmott, C. J. (1981). *On the validation of models*. DOI: 10.1080/02723646.1981.10642213.
- WMO (2009). *Lincoln Declaration on Drought Indices*.
- (2012). *Standardized Precipitation Index user guide*. World Meteorological Organization.
- WMO y GWP (2016). *Handbook of drought indicators and indices*. Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva: World Meteorological Organization y Global Water Partnership, pág. 45.
- Yi, Yonghong, John S. Kimball, Lucas A. Jones, Rolf H. Reichle y Kyle C. McDonald (2011). «Evaluation of MERRA land surface estimates in preparation for the soil moisture active passive mission». En: *Journal of Climate* 24.15, págs. 3797-3816. DOI: 10.1175/2011JCLI4034.1.
- Yue, Sheng, T. B. M. J. Ouarda, B. Bobée, P. Legendre y P. Bruneau (1999). «The Gumbel mixed model for flood frequency analysis». En: *Journal of Hydrology* 226.1-2, págs. 88-100. DOI: 10.1016/S0022-1694(99)00168-7.
- Zargar, Amin, Rehan Sadiq, Bahman Naser y Faisal I Khan (2011). «A review of drought indices». En: *Environmental Reviews* 19.NA, págs. 333-349. DOI: 10.1139/a11-013.