



*Universidad Nacional de Córdoba*  
*Facultad de Ciencias Agropecuarias*  
*Escuela para Graduados*



---

**DETERMINACIÓN DE ESCENARIOS POR SEQUÍA  
MEDIANTE ANÁLISIS MULTIVARIADO TEMPORAL  
USANDO REDES NEURONALES EN MÉXICO**

**José Carlos Douriet Cárdenas**

Tesis  
Para optar al Grado Académico de  
Doctor en Ciencias Agropecuarias

*Córdoba, 2017*

# **DETERMINACIÓN DE ESCENARIOS POR SEQUÍA MEDIANTE EL ANÁLISIS MULTIVARIADO TEMPORAL USANDO REDES NEURONALES EN MÉXICO**

**José Carlos Douriet Cárdenas**

## **Comisión Asesora de Tesis**

**Director:** Dr. Andrés Carlos Ravelo

**Asesores:** Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco (Codirector)

Dr. Carlos Marcelo García Rodríguez

## **Tribunal Examinador de Tesis**

Dr. Carlos Marcelo García Rodríguez \_\_\_\_\_

Dr. Antonio de la Casa \_\_\_\_\_

Dra. Cruz Elisa Torrencillas Nuñez \_\_\_\_\_

## **Presentación formal académica**

07 de diciembre de 2017

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Universidad Nacional de Córdoba

## **AGRADECIMIENTOS**

*Principalmente quiero agradecer al Dr. Andrés Carlos Ravelo, Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco y al Dr. Carlos Marcelo García, miembros del Comité Tutorial por todo su apoyo y tiempo brindado, en especial al Dr. Ravelo por sus valiosas asesorías, colaboración, conducción y todo su apoyo recibido durante el desarrollo de los trabajos y la escrituración de la tesis.*

*Agradezco a los Miembros del Tribunal, Dra. Cruz Elisa Torrecillas Núñez, Dr. Antonio de la Casa y al Dr. Carlos Marcelo García por dedicar su valioso tiempo a la revisión de este trabajo, por la minuciosa lectura y el aporte constructivo desinteresado para mejorar este trabajo.*

*Gracias a la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la UNC, por brindarme formación de posgrado. En particular quiero agradecer a los integrantes del CREAN por brindarme su apoyo y compañía.*

*A la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) por brindarme la oportunidad de continuar con los estudios de posgrado en el Doctorado en Ciencias Agrícolas de la UNC con enfoque en el análisis de sequías.*

*Al Ing. Rafael Sanz Ramos, Director Técnico, del Organismo de Cuenca Pacífico Norte de la CONAGUA) por su apoyo incondicional, permanente y las facilidades otorgadas para realizar el posgrado y el trabajo de tesis.*

*Al Dr. Felipe I. Arreguín Cortés, Director General de Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) quien siendo Subdirector General Técnico de la CONAGUA, brindo apoyos para la realización de este posgrado.*

*A todos mis profesores de los cursos y pasantías de Doctorado, por los conocimientos que me transmitieron durante el desarrollo del posgrado y el esfuerzo realizado para apoyarme en la formación en el campo del análisis multivariado temporal de sequías mediante el uso de redes neuronales, principalmente al M.C. Gustavo Ovando y Dra. Monica Bocco por sus valiosas aportaciones en los cursos sobre redes neuronales artificiales impartidos durante las estancias académicas en el CREAN-UNC.*

*Al Grupo de Monitoreo y Evaluación de las Formas de las Sequías (GMFS) del Organismo de Cuenca Pacífico Norte, en especial a Miguel Garnica López, Juan Bautista*

*Esquerra Franco y Felipe de Jesús Douriet Olivas, por su constante cooperación en el desarrollo de estos trabajos, desde su espacio en la Consultoría Soluciones Hidráulicas del Pacífico (SHP), creada específicamente para el financiamiento de los costos de esta investigación. Así como a mis amigos Julio Apodaca, Jaime Castro y Noel López por su valioso y desinteresado apoyo.*

*Agradezco también a todos los que si bien no aportaron directamente a esta tesis han ayudado a mi crecimiento y maduración profesional, académica y personal. En especial a mis compañeros de JRC de EUROCLIMA por su amistad incondicional, apoyo y estímulo que me brindaron durante las Reuniones y Talleres de Desertificación y Sequía en diferentes países de Latinoamérica, con énfasis especial al Dr. Paulo Barbosa (Portugal), Dr. Hugo Carrao (Portugal), Dr. Andrés Ravelo (Argentina), Dra. Ana Planchuelo (Argentina), MC Tania Maria Peña (Honduras), MC Roberto Zanvettor (Argentina) y Dr. Roberto Aroche (Cuba).*

*Finalmente a mis compañeros de las Dirección Técnica y en especial a mi amigo el Ing. José Román López Director de Administración del Agua del Organismo de Cuenca Pacífico Norte, que de alguna forma u otra contribuyeron en la conclusión de este trabajo.*

## **DEDICATORIA**

A mis padres José Luis (que en paz descanse) y Felipa por formarme con valores y enseñarme la cultura del esfuerzo necesarios para la realización de mis estudios y el logro de metas.

A mi esposa Marina Olivas Estrada por su comprensión y apoyo durante la realización del doctorado.

A mis hijos Karla Marina Yamilet, Felipe de Jesús, Ana Luisa, María Guadalupe, mis nietos Valeria de Montserrat, Logán Alexander, Jesús Nicolás, Hanna Nikol, Lilian Ximena y Edgar Leonardo que han sido mi motivación en la vida.

A todos mis hermanos: Jorge, Miguel, Martha, Vicente, Javier, César, Jesús, Mario y con especial cariño a Delfina por su desinteresado e incondicional apoyo.

## RESUMEN

Las sequías se presentan recurrentemente en cualquier parte del mundo, lo cual incluye a México y al Organismo Cuenca Pacífico Norte (OCPN), con fuertes impactos adversos en aspectos económicos, sociales y ambientales. La importancia de este estudio radica en el análisis multivariado temporal y la determinación de escenarios por sequía mediante el uso de redes neuronales y puede servir como modelo para otras cuencas. Las redes neuronales artificiales se aplican para realizar pronósticos de sequías hidrológicas considerando la interacción de las variables que intervienen en el proceso lluvia-escurrimiento. La aplicación se llevó a cabo en el OCPN, que se ubica en el noroeste de México, entre las coordenadas 28°10'30" y 21°41'49" de LN y 103°27'50" y 109°25'55" de LW, con una extensión total de 152.007 km<sup>2</sup>. Se realizó el análisis y determinación de escenarios de sequía para el período 1978-2016 y consistió en el monitoreo temporal y espacial de sequías meteorológicas, utilizando índices puntuales (SPI y PDSI) y satelital (NDVI) e hidrológicas utilizando volúmenes de escurrimiento mensual (Q), e índices de Escurrimiento de Sequía (SDI) y de Estado de las presas (Ie) para las principales presas del OCPN. Se determinaron pronósticos de escenarios a 1, 2 y 3 meses usando el análisis multivariado temporal, redes neuronales, variables climatológicas y de cuenca y se estimó la vulnerabilidad a las sequías para el año 2016. Los resultados demuestran que el pronóstico de Q más preciso fue obtenido por el modelo de red neuronal Perceptron Multilayer de dos capas. Además, el análisis de la variación climática con relación al fenómeno de El Niño demuestra que hay muy baja correlación y baja predictibilidad de sus efectos a escalas locales y regionales. Solamente cuando se encuentra en fase negativa (La Niña) con intensidades menores a -1,07 °C aumenta la probabilidad de su predicción y efectos. Se encontró que la presa El Varejonal ofrece mayor capacidad de resiliencia que la presa Sanalona ante escenarios de sequías extremas y que la combinación de escenarios más desfavorable es la de año seco seguido por año seco. Por lo mencionado, se recomiendan realizar las acciones establecidas en el Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación de Sequías del Consejo de Cuenca de los Ríos Mocerito al Quélite, contribuyendo así a la gestión integral de cuencas para la prevención, mitigación, adaptación y respuesta a las sequías.

**PALABRAS CLAVE:** Índices de sequías, escurrimiento, satelital, El Niño, La Niña, Organismo de Cuenca Pacífico Norte.

## **ABSTRACT**

Droughts recurrently occur in any part of the world, including Mexico and the North Pacific Basin Organization (OCPN), with strong economic, social and environmental impacts. The importance of this study is based in the multivariate temporal analysis and the determination of drought scenarios using neural networks and it can be used as a model for other basins. The artificial neural networks are used to forecast hydrological droughts considering the interaction of the variables involved in the rain-runoff process. The application was carried out at the OCPN, located in the northwest of Mexico, between 28 ° 10'30" and 21 ° 41'49" LN and 103 ° 27'50" and 109 ° 25' 55" LW, with a total area of 152,007 km<sup>2</sup>. The analysis and determination of drought scenarios were carried out for the 1978-2016 period and consisted in the temporal and spatial monitoring of meteorological droughts, using point indices (SPI and PDSI) and satellite (NDVI) and hydrological droughts using monthly runoff volumes (Q), the Streamflow Drought Index (SDI) and Dams Status index (Ie) in the main dams of the OCPN; Determining scenarios at 1, 2 and 3 months, based on the temporal multivariate analysis and use of neural networks, climatological and basin variables and estimated vulnerability to drought in 2016. The results showed that the most accurate Q prognosis was obtained by the two-layer Perceptron Multilayer neural network model. In addition, the analysis of climatic variation in relation to the El Niño event showed that there is very low correlation and low predictability of its effects at local and regional scales; however, when it is in the negative phase (La Niña) with intensities lower than -1,07 ° C increases the probability of forecasting and impacts. It was found that the El Varejonal Dam has greater resilience capacity than the Sanalona Dam with extreme drought scenarios and the combination of the worst scenarios is the dry year followed by a dry year. Therefore, it is recommended to implement the actions established in the Preventive Measures and Drought Mitigation Program of the Mocerito to Quelite Rivers Watershed Council, and therefore contributing to the basin integrated management for prevention, mitigation, adaptation and response to droughts.

**KEYWORDS:** Indices of droughts, runoff, satellite, El Niño, La Niña, North Pacific Basin Organization.

## TABLA DE CONTENIDOS

LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE FOTOS .....	XV
LISTA DE TABLAS .....	XV
LISTA DE ABREVIATURAS .....	XIX
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
INTRODUCCIÓN .....	2
El agua y su escasez.....	3
La sequía a nivel mundial, nacional y regional .....	4
Definiciones, enfoques, estudios e índices .....	8
Definiciones y tipos de sequía .....	9
Definición adoptada de sequía.....	12
Enfoques de sequía .....	12
Características del fenómeno .....	13
Estudios y eventos sobre sequías .....	14
Índices de sequías .....	17
Monitoreo, evaluación y pronóstico de sequías.....	20
Monitoreo, evaluación y Sistemas Operativos de sequías .....	20
Pronóstico de sequías.....	23
El Proyecto de sequías en el OCPN.....	27
PRONACOSE y los PMPMS en el OCPN.....	29
Vulnerabilidad y riesgo de sequías (organiza con 1.5 y 1.6).....	32
Estado del arte de redes neuronales (organiza con 1.4).....	33
Que son las Redes Neuronales Artificiales (RNA).....	33
Utilidad de las RNA.....	34
Aplicaciones de las RNA en el pronóstico de sequías en el OCPN .....	35
Validación de las aplicaciones de las RNA en el pronóstico de sequías en el OCPN.....	36
Escenarios Climáticos y pronósticos de sequías (organiza con 1.4).....	37
Prevención, mitigación y adaptación a la sequía en un contexto de cambio climático .....	38
Hipótesis .....	39
Objetivos.....	39
Objetivo general.....	39



Objetivos específicos .....	39
Importancia del estudio.....	40
<b>CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>41</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>42</b>
Materiales.....	42
Caracterización de la zona de estudio .....	42
Indicadores normativos de las fases de la sequía.....	49
Base de datos .....	56
Programas y sistemas computacionales .....	65
Métodos .....	67
Monitoreo temporal y espacial de las sequías meteorológicas e hidrológicas .....	69
Uso de las Redes Neuronales Artificiales (RNA).....	87
Pronóstico de sequías meteorológicas e hidrológicas.....	90
Representación gráfica temporal y espacial de la sequía.....	96
Estimación de la vulnerabilidad a de sequía .....	97
Determinación de escenarios por sequía.....	101
<b>CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>110</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>112</b>
Monitoreo temporal y espacial de las sequías meteorológicas e hidrológicas .....	112
Monitoreo de sequías meteorológicas.....	112
Monitoreo de sequías hidrológicas .....	151
La variabilidad histórica de los índices de sequías (P, SPI, PDSI, Q, SDI, Ie) y su relación con el fenómeno de El Niño .....	172
Pronóstico temporal y espacial de las sequías meteorológicas.....	183
Pronóstico de sequías meteorológicas .....	183
Pronóstico de sequías hidrológicas .....	200
Vulnerabilidad a las sequías meteorológicas en el OCPN.....	232
Vulnerabilidad a las sequías por consejo de cuenca .....	235
Vulnerabilidad municipal a las sequías .....	237
Determinación de escenarios por sequías en el Sistema Hídrico Río Culiacán (SHRC) ...	241
Determinación de escenarios por sequías meteorológicas en el SHRC.....	242
Determinación de escenarios por sequías hidrológicas en el SHRC. ....	249

CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	269
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	269
CONCLUSIONES .....	270
RECOMENDACIONES.....	274
CAPÍTULO 5 BIBLIOGRAFÍA .....	275
ANEXOS .....	295
Anexo 1: Redes Neuronales.....	295
Anexo 2: Variabilidad de Precipitación Mensual y Precipitación Mensual Acumulada....	313
Anexo 3: El Niño Análisis detallado del comportamiento de la variabilidad climática y de escurrimientos en el OCPN para eventos del fenómeno de El Niño. ....	316
Anexo 4: Plan de Riego .....	319
Anexo 5: Pronóstico de Sequía Meteorológica.....	321
Anexo 6: Representación Espacial de Índice SPI 12.....	328
Anexo 7: Propuesta de mejoras en la metodología utilizada para la estimación de las vulnerabilidades económicas, sociales, ambientales y globales .....	331

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Secuencia de la ocurrencia de sequías y sus impactos para los tipos de sequía comúnmente aceptados. (Adaptada de NDMC, 2016, <a href="http://drought.unl.edu">http://drought.unl.edu</a> ). .....	11
Figura 1.2: Definición de las características de sequías usando PDSI, con nivel de referencia $X_0=0$ . (Adaptada de Valiente, 2001; Douriet, 2010). .....	13
Figura 2.1. Localización del Organismo de Cuenca Pacífico Norte. ....	43
Figura 2.2. Municipios del Organismo de Cuenca Pacífico Norte.....	44
Figura 2.3.- Mapa de cuencas de los principales ríos y grupo de corrientes independientes que integran el OCPN. ....	45
Figura 2.4. Climas predominantes en el área de estudio (CONAGUA, 2012). ....	48
Figura 2.5: Estaciones climatológicas, hidrométricas y presas en el Organismo de Cuenca Pacífico Norte .....	59
Figura 2.6: Diagrama del proceso para la determinación de escenarios por sequía.....	69
Figura 2.7: Estructura de RNA utilizada para el pronóstico de sequías hidrológicas usando.....	89
Figura 2.8: Esquema descriptivo de la metodología general empleada para el pronóstico de sequías hidrológicas utilizando redes neuronales en el OCPN. ....	95
Figura 2.9. Sistema Hídrico Río Culiacán (Cuenca y acuífero del Río Culiacán); adaptado de (Douriet, 2010).....	103
Figura 3.1: Isoyetas de normales de precipitación en el Organismo de Cuencas del Pacífico Norte (OCPN), en el período 1978-2015 .....	113
Figuras 3.2: Normales de precipitación mensual en las estaciones: a) Culiacán y b) Huites.....	115
Figuras 3.3: Variabilidad anual de las precipitaciones en las estaciones: a) Culiacán y b) Huites. ....	117
Figuras 3.4: Anomalías de precipitación en la estación Culiacán: a) mensuales y b) acumulada anual para los años secos y húmedos. ....	118
Figuras 3.5: Variación histórica de los índices a) SPI3, b) SPI6 y c) SPI12, período 1978-2015. ....	123
Figura 3.6: Valores del PDSI, a) Estación Culiacán y b) Estación Huites. Período 1978-2015 ....	126
Figura 3.7: Valores de NDVI y de sus diferencias con respecto a su valor medio en la estación Culiacán, período 2000-2015. ....	128
Figuras 3.8: Isoyetas de: a) Normales de precipitación y b) por clasificación en rangos de 200 mm de precipitación. ....	130
Figuras 3.9: Isoyetas de: a) Un año con sequía incipiente (2010) y b) sus anomalías de precipitación.....	131

Figura 3.10: Isoyetas de: a) un año con sequía muy intensa y presencia de helada al principios del mes de febrero (2011) y b) sus anomalías.....	132
Figura 3.11: Isoyetas de: a) un año con sequía reciente (2012) y b) sus anomalías.....	134
Figura 3.12: Isoyetas de: a) un año inicialmente seco con la presencia del huracán Manuel (2013) y b) sus anomalías. ....	135
Figura 3.13: Isoyetas de: a) un año de normal a húmedo reciente (2014) y b) sus anomalías....	136
Figura 3.14: Isoyetas de: a) un año húmedo reciente (2015) con la presencia del fenómeno de El Niño y b) sus anomalías. ....	137
Figura 3.15: Mapa de la variabilidad espacial del índice SPI3 en febrero de 2011 en el OCPN. Los puntos rojos corresponden a las estaciones meteorológicas consideradas. ....	139
Figura 3.16: Mapas de evolución de la sequía en el OCPN, período julio-octubre de 2011; SPI3.	141
Figura 3.17: Mapas de evolución de la sequía en el OCPN, para el mes de septiembre en el período 2012-2015; SPI3. ....	143
Figura 3.18: Mapa de la variabilidad espacial del índice PDSI en febrero de 2011 en el OCPN. .	143
Figura 3.19: Mapas de evolución de la sequía (PDSI) en el OCPN, período julio-octubre de 2011. ....	145
Figura 3.20: Mapas de evolución de la sequía en el OCPN, del mes de septiembre de los años 2012-2015, utilizando el índice PDSI. ....	147
Figura 3.21: Variabilidad espacial de la sequía en el OCPN mediante el NDVI, al primero de octubre de los años: 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 y 2015.....	148
Figura 3.22: Variabilidad espacial de la sequía en el OCPN mediante el NDVI, en febrero de 2011. ....	150
Figura 3.23: Esgurrimientos históricos de ingreso a las presas Sanalona, Adolfo López Mateos y Luis Donaldo Colosio en $\text{hm}^3$ al año.....	153
Figura 3.24: Normales de escurrimiento mensual de ingreso a las presas Sanalona, Adolfo López Mateos y Luis Donaldo Colosio, en $\text{hm}^3$ .....	154
Figura 3.25: Esgurrimiento acumulado mensual, en las presas a) Sanalona, b) Adolfo López Mateos y c) Luis Donaldo Colosio, en $\text{hm}^3$ .....	156
Figura 3.26: Valores del SPI12, a) Estación Sanalona y b) Estación Varejonal. Período 1978-2015 .....	159
Figura 3.27: Variabilidad espacial del SPI12 en el OCPN, para el mes de junio de 2012.....	161
Figura 3.28: Índice de escurrimiento de sequía (SDI) mensual, Sanalona, Varejonal y Huites. ...	164
Figura 3.29: Gráficas del índice Ie en las presas Sanalona, Varejonal y Huites. ....	171

Figura 3.30: Anomalía de temperatura promedio histórica de la superficie del mar en °C (SST) de la región Niño 3.4 en el Pacífico Ecuatorial (NOAA, 2017). .....	173
Figura 3.31: Anomalías de Temperatura (°C) y precipitación en las estaciones Sanalona, Varejonal, Guamúchil y Huites; período 1982-2015. ....	178
Figura 3.32: Anomalías de Temperatura (°C) y escurrimientos en las presas Sanalona, Adolfo López Mateos, Eustaquio Buelna y Luis Donaldo Colosio; período 1982-2015.....	179
Figura 3.33: Anomalías de Temperatura de la superficie del mar SST (°C) y PDSI en las estaciones Sanalona, El Varejonal, Guamúchil y Huites; período 1982-2015. ....	180
Figura 3.34: Anomalías de Temperatura de la superficie del mar SST (°C) Vs SDI en las presas Sanalona, Adolfo López Mateos, Eustaquio Buelna y Luis Donaldo Colosio; período 1982-2015. ....	181
Figura 3.35: Anomalías de Temperatura de la superficie del mar SST (°C) Vs Ie en las presas Sanalona, Adolfo López Mateos, Eustaquio Buelna y Luis Donaldo Colosio; período 1982-2015. ....	182
Figura 3.36: Pronóstico de SPI3 a 1, 2 y 3 meses en la estación El Varejonal para el año 2015...	186
Figura 3.37: Pronóstico de PDSI a 1, 2 y 3 meses en la estación El Varejonal para el año 2015..	191
Figura 3.38: Mapas del PDSI pronosticado vs. PDSI estimado para los meses marzo, abril y mayo de 2015 en la estación El Varejonal para el año 2015. ....	195
Figura 3.39: Mapas del PDSI pronosticado vs. PDSI estimado para los meses junio, julio y agosto de 2015 en la estación El Varejonal para el año 2015. ....	197
Figura 3.40: Mapas del PDSI pronosticado vs. PDSI estimado para los meses septiembre, octubre y noviembre de 2015 en la estación El Varejonal para el año 2015. ....	199
Figura 3.41: Grafica de dispersión de volúmenes de ingreso mensuales (hm <sup>3</sup> ) estimados vs. observados en la presa El Varejonal, período 1978-2015. ....	201
Figura 3.42: Volúmenes de ingreso mensuales Q (hm <sup>3</sup> ) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa El Varejonal, período 1978-2015. ....	203
Figura 3.43: Volúmenes de ingreso mensuales Q (hm <sup>3</sup> ) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa El Varejonal, año 2011. ....	206
Figura 3.44: Volúmenes de ingreso mensuales Q (hm <sup>3</sup> ) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa El Varejonal, año 2012. ....	207
Figura 3.45: Volúmenes de ingreso mensuales Q (hm <sup>3</sup> ) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa El Varejonal, año 2013. ....	208
Figura 3.46: Volúmenes de ingreso mensuales Q (hm <sup>3</sup> ) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa El Varejonal, año 2014. ....	209

Figura 3.47: Volúmenes de ingreso mensuales Q (hm <sup>3</sup> ) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa El Varejonal, año 2015.....	210
Figura 3.48: Volúmenes de ingreso mensuales Q (hm <sup>3</sup> ) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa Sanalona, año 2011.....	212
Figura 3.49: Volúmenes de ingreso mensuales Q (hm <sup>3</sup> ) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa Sanalona, año 2012.....	214
Figura 3.50: Volúmenes de ingreso mensuales Q (hm <sup>3</sup> ) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa Sanalona, año 2013.....	214
Figura 3.51: Volúmenes de ingreso mensuales Q (hm <sup>3</sup> ) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa Sanalona, año 2014.....	215
Figura 3.52: Volúmenes de ingreso mensuales Q (hm <sup>3</sup> ) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa Sanalona, año 2015.....	216
Figura 3.53: Volúmenes de ingreso mensuales Q (hm <sup>3</sup> ) observados (Azul) vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas (Verde) y la Función de Distribución de Probabilidad al 98% (Rojo), para las presas a) Sanalona y b) El Varejonal, período 2011-2015..	219
Figura 3.54: Volúmenes de almacenamiento al primer día de cada mes V (hm <sup>3</sup> ) observados (Azul) vs estimados utilizando los pronósticos obtenido mediante Redes Neuronales (Verde) y la FDP al 98% (Rojo), para las presas a) Sanalona y b) El Varejonal, período 2011-2015.....	222
Figura 3.55: SDI mensual observados (Azul) vs estimados mediante Redes Neuronales Univariadas (Magenta) para la presa El Varejonal, período 2010-2015. ....	224
Figura 3.56: SDI mensuales observados (Azul) vs estimados (Negro), para las presas a) Sanalona y b) El Varejonal, período 2011-2015.....	227
Figura 3.57: IE mensuales observados (Azul) vs estimados (Negro), para las presas a) Sanalona y b) El Varejonal, período 2011-2015.....	228
Figuras 3.58: Mapas de vulnerabilidad Económica (a), Social (b), Ambiental (c) y global (d) de la RHA3PN. Año 2016. ....	235
Figuras 3.58, Continuación: Mapas de vulnerabilidad Económica (a), Social (b), Ambiental (c) y global (d) de la RHA3PN. Año 2016. ....	236
Figuras 3.59: Mapa de vulnerabilidad global de la RHA3PN. Año 2015.....	241
Figuras 3.60: Mapas de PDSI estimados vs pronosticados en el SHRC para los meses marzo, abril y mayo del año 2015. ....	243
Figuras 3.61: Mapas de PDSI estimados vs pronosticados en el SHRC para los meses junio, julio y agosto del año 2015.....	244

Figuras 3.62: Mapas de PDSI estimados vs pronosticados en el SHRC para los meses septiembre, octubre y noviembre del año 2015. ....	245
Figuras 3.63: Mapas de PDSI estimados vs pronosticados en el SHRC para los meses enero, febrero y marzo del año 2016. ....	246
Figuras 3.64: PDSI estimados vs pronosticados a un mes para los meses enero, febrero y marzo del año 2016, en las estaciones El Varejonal, Culiacán y Sanalona que tienen influencia en el SHRC . ....	248
Figuras 3.65: Escenarios de sequías hidrológicas Q (hm <sup>3</sup> ) mensuales pronosticados vs observados en el la presa Sanalona, del SHRC, para los meses del año 2016. ....	251
Figuras 3.66: Escenarios de sequías hidrológicas SDI mensuales pronosticados vs observados en el la presa Sanalona, del SHRC, para los meses del año 2016. ....	252
Figuras 3.67: Escenarios de sequías hidrológicas IE mensuales pronosticados vs observados en el la presa Sanalona, del SHRC, para los meses del año 2016. ....	255
Figuras 3.68: Escenarios de sequías hidrológicas Q (hm <sup>3</sup> ) mensuales pronosticados vs observados en la presa El Varejonal, del SHRC, para los meses del año 2016. ....	258
Figuras 3.69: Escenarios de sequías hidrológicas Q (hm <sup>3</sup> ) mensuales pronosticados vs observados en la presa El Varejonal, del SHRC, para los meses del año 2016. ....	261
Figuras 3.70: Escenarios de sequías hidrológicas Q (hm <sup>3</sup> ) mensuales pronosticados vs observados en la presa El Varejonal, del SHRC, para los meses del año 2016. ....	265

## LISTA DE FOTOS

Foto A: Vista panorámica del vaso de almacenamiento de la presa Sanalona desde la cortina hacia aguas arriba, en el mes de junio de 2012, con un nivel de almacenamiento del 3% .....	161
---	-----

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Principales presas en el Organismo de Cuenca Pacífico Norte.....	46
Tabla 2.2. Balance hidráulico de los acuíferos en el Organismo de cuenca Pacífico Norte. ....	47
Tabla 2.3. Índices de sequía meteorológica y los programas utilizados en su estimación.....	49
Tabla 2.4: Clasificación de rangos de valores del SPI y su paleta de colores definida en el SOS (Hayes, 2000; Ravelo, 2009).....	50
Tabla 2.5: Clasificación de rangos de valores del PDSI y su paleta de colores definida en el SOS (Palmer, 1965; Ravelo, 2009). ....	51

Tabla 2.6. Clasificación de rangos de valores del NDVI y su paleta de colores definida en el SOS (Ravelo, 2009).....	53
Tabla 2.7: Índices de sequía hidrológica y los programas utilizados en su estimación .....	53
Tabla 2.8: Clasificación de rangos de valores del SDI y su paleta de colores definida (Nalbantis, 2008) y (Ravelo, 2012). .....	54
Tabla 2.9. Valores del índice de estado ( $I_e$ ) y niveles de sequía correspondientes. ....	55
Tabla 2.10: Indicadores de Vulnerabilidad a las sequías determinada por el método propuesto por IMTA (2015).....	56
Tabla 2.11: Estaciones climatológicas, meteorológicas e hidrométricas en el OCPN y su localización. ....	57
Tabla 3.1: Valores del SPI a 3 meses, período 1978-2015, Estación Culiacán.....	120
Tabla 3.2: Valores del PDSI, período 1978-2015, Estación Culiacán. ....	124
Tabla 3.3: Valores del SPI12, período 1978-2015, Estación Sanalona.....	158
Tabla 3.4: El SDI de la presa Sanalona, período 1948-2015. ....	163
Tabla 3.5: El $I_e$ de la presa Sanalona, período 1948-2015.....	168
Tabla 3.6: Eventos La Niña ocurridos en el período 1982-2015, indicando su intensidad.....	174
Tabla 3.7: Valores de $R^2$ de variables e índices meteorológicos Vs anomalías de El Niño en estaciones climatológicas del OCPN, período 1982-2015.....	175
Tabla 3.8: Valores de $R^2$ de variables e índices hidrológicos Vs anomalías de El Niño en estaciones climatológicas del OCPN, período 1982-2015. ....	175
Tabla 3.9: Pronóstico del SPI3 a 1, 2 y 3 meses de la estación Varejonal, año 2015. ....	184
Tabla 3.10: Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), coeficiente de concordancia (d) y errores absoluto medio (MAE), cuadrático medio (MRSE) y porciento del cuadrático medio (%MRSE) entre valores calculados y pronosticados del SPI3 mensual para las localidades Culiacán, Sanalona, El Varejonal y Huites para el año 2015 (n=12). ....	188
Tabla 3.11: Pronóstico del PDSI a 1, 2 y 3 meses de la estación Varejonal, año 2015. ....	189
Tabla 3.12: Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), coeficiente de concordancia (d) y errores y errores absoluto medio (MAE), cuadrático medio (MRSE), d y porciento del cuadrático medio (%MRSE) entre valores calculados y pronosticados del PDSI mensual para las localidades Culiacán, Sanalona, El Varejonal y Huites para el año 2015 (n=12).....	190
Tabla 3.13: Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), coeficiente de concordancia de Willmott (d) y errores absoluto medio (MAE), cuadrático medio (MRSE), y porciento del cuadrático medio (%MRSE) entre valores calculados y pronosticados de los volúmenes mensuales de ingreso a la presa Sanalona para el año 2015 (n=12). ....	202



Tabla 3.14: Valores de producción de escurrimiento Q (hm <sup>3</sup> /mes) mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa El Varejonal para el período 2011-2015 y sus respectivos criterios de correlación y de estimación de errores (R <sup>2</sup> , d, MAE, MRSE y %MRSE) entre valores calculados y pronosticados (n=12, para cada año). .....	205
Tabla 3.15: Valores de producción de escurrimiento Q (hm <sup>3</sup> /mes) mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa Sanalona para el período 2011-2015 y sus respectivos criterios de correlación y determinación de errores (R <sup>2</sup> , MAE, MRSE, d y %MRSE) entre valores calculados y pronosticados (n=12, para cada año). .....	211
Tabla 3.16: Evaluación del pronóstico de volúmenes de escurrimiento mensual de ingreso a las presas El Varejonal y Sanalona Q (hm <sup>3</sup> /mes), mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas, la Función de Distribución de Probabilidad de ocurrencia al 98 % y los valores observados, para el período 2011-2015, utilizando los criterios: R <sup>2</sup> , MAE, MRSE, d y %MRSE, (n=60). .....	218
Tabla 3.17: Evaluación del pronóstico de volúmenes de almacenamiento al primer día de cada mes en las presas El Varejonal y Sanalona Q (hm <sup>3</sup> /mes), mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas, la Función de Distribución de Probabilidad de ocurrencia al 98 % y los valores observados, para el período 2011-2015, utilizando los criterios: R <sup>2</sup> , MAE, MRSE, d y %MRSE, (n=60). .....	221
Tabla 3.18: Evaluación del pronóstico del SDI mensual en las presas El Varejonal y Sanalona, estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas vs los valores observados, para el período 2011-2015, utilizando los criterios: R <sup>2</sup> , MAE, MRSE, d y %MRSE, (CDE) (n=60). .....	225
Tabla 3.19: Evaluación del pronóstico del SDI mensual en las presas El Varejonal y Sanalona, estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas vs los valores observados, para el período 2011-2015, utilizando los criterios: R <sup>2</sup> , MAE, MRSE, d y %MRSE (CDE), (n=60). .....	231
Tabla 3.20: Evaluación de la vulnerabilidad a la sequía por municipios en el OCPN, 2016. ....	233
Tabla 3.21: Evaluación de la vulnerabilidad a la sequía por municipios en la RHA3 PN, mediante metodología propuesta por CONAGUA, para los años 2015 y 2016. ....	234
Tabla 3.22: Evaluación de escenarios de sequía meteorológica mediante el índice PDSI, en las estaciones El Varejonal, Culiacán y Sanalona, estimados mediante redes neuronales vs los valores observados, para el período enero 2015 a marzo 2016, utilizando los criterios: R <sup>2</sup> , d, MAE, MRSE y %MRSE, (n=15). .....	247
Tabla 3.23: Evaluación de escenarios de sequía hidrológica (Q) mensual en la presa Sanalona, estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas vs los valores observados, para el año 2016, utilizando los criterios: R <sup>2</sup> , d, MAE, MRSE y %MRSE, (n=12). .....	250

Tabla 3.24: Evaluación de escenarios de sequía hidrológica (SDI) mensual en la presa Sanalona, estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas vs los valores observados, para el año 2016, utilizando los criterios: $R^2$ , d, MAE, MRSE y %MRSE (CDE), (n=12). .....	252
Tabla 3.25: Evaluación de escenarios de sequía hidrológica (IE) mensual en la presa Sanalona, estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas vs los valores observados, para el año 2016, utilizando los criterios: $R^2$ , d, MAE, MRSE y %MRSE (CDE), (n=12). .....	255
Tabla 3.26: Evaluación de escenarios de sequía hidrológica (Q) mensual en la presa ALM, estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas vs los valores observados, para el año 2016, utilizando los criterios: $R^2$ , d, MAE, MRSE y %MRSE (CDE), (n=12). .....	257
Tabla 3.27: Evaluación de escenarios de sequía hidrológica (SDI) mensual en la presa Adolfo López Mateos, estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas vs los valores observados, para el año 2016, utilizando los criterios: $R^2$ , d, MAE, MRSE y %MRSE (CDE), (n=12). .....	261
Tabla 3.28: Evaluación de escenarios de sequía hidrológica (IE) mensual en la presa Adolfo López Mateos, estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas vs los valores observados, para el año 2016, utilizando los criterios: $R^2$ , d, MAE, MRSE y %MRSE (CDE), (n=12). .....	264

## LISTA DE ABREVIATURAS

%MRSE	Porcentaje del Cuadrático Medio
AB	Aurelio Benassini
ALM	Adolfo López Mateos
CDE	Coefficientes de Determinación y Error
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
d	Coefficiente de Concordancia de Willmott
DE	Desviación Estándar
DOF	Diario Oficial de la Federación
EB	Eustaquio Buelna
FIRA	Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura
GDO	Gustavo Díaz Ordaz
hm <sup>3</sup>	Hectómetros Cúbicos
IAF	Índice del área foliar
ICA	Índice de la Calidad del Agua
IDHS	Índice de Déficit de Humedad en Suelos
IE	Índice de Estado
IHS	Índice de Humedad en Suelos
JLP	José López Portillo
Km <sup>2</sup>	Kilómetros Cuadrados
LDC	Luis Donaldo Colosio
MAE	Error Absoluto Medio
MRSE	Cuadrático Medio
NDVI	Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación
OCPN	Organismo de Cuenca Pacífico Norte
OMM	Organización Meteorológica Mundial
P	Precipitación
PAA	Precipitación Acumulada Anual
PDSI	Índice de Severidad de Sequía de Palmer

PMPMS	Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación a la Sequía
PN	Pacífico Norte
PRONACOSE	Programa Nacional Contra la Sequía
R <sup>2</sup>	Coefficiente de Determinación
RH	Región Hidrológica
RHA	Región Hidrológica Administrativa
RN	Redes Neuronales
RNA	Redes Neuronales Artificiales
SAEDAS	Sistema Automatizado de Estimación de la Disponibilidad de Aguas Superficiales
SAN	Sanalona
SCT	Secretaria de Comunicaciones y Transporte
SDI	Índice de Sequía de Escurrimiento
SEDESOL	Secretaria de Desarrollo Social
SEMARNAT	Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SERES	Sistema de Evaluación del Riego Extremo
SERS	Sistema de Evaluación del Riesgo por Sequía
SHCP	Secretaria de Hacienda y Crédito Público
SHRC	Sistema Hídrico Río Culiacán
SIAS	Sistema de Información de Aguas Superficiales
SIG	Sistema de Información Geográfica
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SOS	Sistema Operativo de Sequías
SPI	Índice Estandarizado de Precipitación
SST	Temperatura Superficial del Mar

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN GENERAL**

## INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico en forma de lluvia es un producto valioso y necesario para la protección y preservación de la vida humana. Las variaciones a gran escala de las precipitaciones conducen a las sequías y las inundaciones, dos fenómenos hidrológicos muy importantes en términos de su impacto en el ecosistema. Por lo tanto, la estimación cuantitativa de la precipitación/escorrentía proporciona información esencial para aplicaciones prácticas en diversos campos como la operación de los embalses, la gestión de los recursos hídricos, la agricultura y la protección contra inundaciones (Chiang, *et al.*, 2007).

La sequía es un desastre natural que se origina por la deficiencia en la precipitación sobre un periodo extendido de tiempo. Es una anomalía temporal que puede suceder en casi todas las zonas climáticas, aún aquellas que tengan exceso de precipitaciones. Las sequías se distinguen de la aridez, porque ésta solo está relacionada con regiones de baja precipitación y es una característica permanente del clima. La deficiencia de precipitaciones por debajo de las normales ocasiona una escasez de agua para el desarrollo de actividades agro-productivas, industriales y sociales, afectando a todos los sectores de la población. Más allá de los costos productivos y monetarios, los impactos de la sequía en la sociedad, perjudican a toda la economía y afectan negativamente el medio ambiente produciendo desequilibrios ecológicos con consecuencias difíciles de revertir. Es por esas razones que con frecuencia, las instituciones de los sectores gubernamentales, públicos y privados deben tomar medidas que ayuden a mitigar los efectos de una sequía (Ravelo, 2012).

Actualmente, más de 2,4 mil millones de personas carecen de saneamiento, y al menos 663 millones no tienen acceso al agua potable. La ineficiencia de saneamiento, agua potable e higiene, causan alrededor de 675.000 muertes prematuras al año, y se estiman pérdidas económicas anuales de hasta 7% del PIB en algunos países. Es posible que de no tomar las medidas correctivas adecuadas esta situación empeore con el cambio climático, ya que se espera que los eventos extremos como las inundaciones y las sequías, que ya

imponen enormes costos sociales y económicos alrededor del mundo, sean de mayor magnitud y que la variabilidad del clima incremente el stress hídrico (CONAGUA, 2016).

## **EL AGUA Y SU ESCASEZ**

La lluvia es la principal fuente de agua que tiene la naturaleza de renovar y de proporcionar de este vital líquido a todos los seres vivos existentes en el planeta. Este proceso es muy complejo y depende de variables como la ubicación geográfica, la altura, la temperatura, entre otras, esto hace que su distribución en el tiempo y en espacio sea muy irregular y heterogénea, presentándose una variabilidad climática natural que se clasifica dependiendo de su normalidad, abundancia o escasez. La normalidad se refiere al valor promedio del clima para una región dada en un tiempo prolongado dado, considerando un período de al menos 30 años de registro (Linsley, 1977); en cambio la abundancia y escasez son considerados como eventos climatológicos extremos para una misma región en un período definido; si las precipitación son abundantes con años de anomalías positivas se consideran húmedos y si son escasas con anomalías negativas los años se consideran secos, a este último evento se le conoce como sequía, la cual para que ocurra se ocupan dos cosas: escasez o ausencia de lluvia y tiempo (NDMC, 2007).

La sequía es una característica natural, recurrente del clima iniciada por condición del del tiempo prolongado seco y cálido que causa una menor disponibilidad de agua de la normal en la superficie de la tierra. Se desarrolla lentamente y de manera imperceptible y puede pasar desapercibida durante mucho tiempo, a diferencia de inundaciones y otros desastres naturales (Tallaksen and Van Lanen, 2004). Ésta es probablemente una de las razones del poco conocimiento público de la sequía y la falta de un marco institucional para hacer frente a la amenaza de la sequía (EurAqua, 2004; Rossi, 2003; Wilhite, 2000).

La sequía afecta a todos los componentes del ciclo del agua a medida que se desarrolla desde su origen como una sequía meteorológica, es decir, déficit en las precipitaciones. Las escasas precipitaciones, a menudo combinadas con altas pérdidas de evaporación, puede causar un déficit en la humedad del suelo para el desarrollo, que conduce posteriormente a

la reducción de la recarga de las aguas subterráneas y de cabeceras de cuenca y, eventualmente, baja corriente de flujo o ríos secos (Maybank *et al.*, 1995).

La escasez del agua plantea una gran amenaza a la naturaleza, a la calidad de vida y a la economía. El aumento en las demandas de los recursos hídricos disponibles suele originar conflictos entre los usuarios competidores del agua. (Hisdal and Tallaksen, 2003).

## **LA SEQUÍA A NIVEL MUNDIAL, NACIONAL Y REGIONAL**

Las condiciones extremas en el clima siempre han afectado a la humanidad (Magaña, 2000). Uno de los eventos climatológicos extremos más perjudiciales es la sequía, la cual recurrentemente azota alguna parte del planeta Tierra; cuando éstas son intensas y prolongadas generan fuertes pérdidas en las actividades agrícolas, ganaderas e industriales con consecuencias sociales y económicas conexas, como son la inseguridad en los suministros alimentarios e importantes pérdidas económicas (Ravelo, 2008; Ravelo *et al.*, 2016). Estos eventos afectan a una amplia variedad de áreas geográficas. A nivel mundial, el 22% del daño económico es causado por los desastres naturales y el 33% del daño en términos del número de personas afectadas puede ser atribuido a la sequía (Keshavarz *et al.*, 2013).

Una de las principales causas de pobreza en el mundo, que está empujando a 135 millones de personas a emigrar de sus países, según un informe de la ONU, es la sequía. En total, ante la persistente falta de lluvias, al sur de África entre 10 y 12 millones de personas se enfrentan a una grave escasez de alimentos. En la actualidad, los países que más sufren las sequías y sus efectos, son: Etiopía, Eritrea, Somalia, Sudan, Uganda, Afganistán, China, India, Irán y Marruecos. En los Estados Unidos, alrededor de \$ 7 billones de dólares se pierden cada año a causa de este evento (NSTC, 2005). Otros ejemplos de la afectación histórica de las sequías en el mundo son los períodos siguientes: 2014-2015 en California, USA; 2010-2015 en China (Zongxing *et al.*, 2012; Qiu, 2010; Department of Water Resources of Yunnan Province, 2011) y en el 2010-2013 en el sur de Estados Unidos (Ma *et al.*, 2013). Además en los años: 2001 en Irán, (Moradi and



Erfanzadeh, 2001); 2005 en Amazonas, Brasil; 2014 en Argentina y en el 2015 en el sur de Chile.

Las sequías constituyen una adversidad climática recurrente en vastas regiones del mundo y su duración e intensidad son causas de importantes pérdidas económicas y interrupciones en las actividades de las comunidades rurales y urbanas. Se considera factible que en un futuro cercano las sequías se intensifiquen a raíz de los cambios climáticos experimentados en las últimas dos décadas, además está pronosticado que aumentará la extensión de territorios afectados por sequías, lo que podría tener un mayor impacto en amplias regiones agrícolas (Ravelo *et al.*, 2016). Por lo que se espera que debido al cambio climático se incremente el riesgo a las sequías, con afectaciones en la disponibilidad de las aguas superficiales y subterráneas debido a la variabilidad estacional e interanual del caudal fluvial (Moss *et al.*, 2008). Este fenómeno se ha venido produciendo con frecuencia, y sus impactos se ven agravados por el aumento de la demanda de agua y la variabilidad hidrometeorológicas debido al cambio climático.

Durante los últimos años los efectos del cambio climático se han combinado con los efectos de la sequía y ha causado graves problemas en diferentes partes del mundo. Las características de un episodio de sequía no se conocen a menudo fácilmente hasta que ocurre. De 1967 y hasta 1992, de los 2,8 millones de personas que sufrían de todos los desastres naturales, aproximadamente el 50% se han visto afectados relativamente por sequías severas. En este período, de los 3,5 millones de personas que murieron por desastres, cerca de 1,3 millones fueron víctimas de la sequía (Obasi, 1994). Este tipo de afectación se puede encontrar en la base de datos internacional de desastres EM-DAT (OFDA/CRED, 2016) o en CRED-UNISDR (2016).

En las cuencas de los ríos sometidos a estrés hídrico severo, habrá una fuerte competencia por los escasos recursos hídricos entre los distintos grupos de interés. Por ejemplo, el impacto hidrológico del cambio climático se ha simulado en 12 ríos de la India por Gosain *et al.*, (2006). Su estudio reveló que bajo un escenario de cambio climático, la severidad de las sequías y la intensidad de las inundaciones en diversas partes de la India

pueden empeorar, y se producirá una reducción general de la cantidad de la escorrentía disponible (Zarghami *et al.*, 2011).

Los países en desarrollo son vulnerables a los cambios climáticos, principalmente debido a sus limitadas capacidades de adaptación (Pouliotte *et al.*, 2009) en relación a los fenómenos extremos. Uno de los principales problemas de estas zonas que se ven afectados por el cambio climático es la calidad y cantidad de los recursos hídricos que se suministran a la creciente población.

Como resultado, la sequía hidrológica ha estado recibiendo mucha atención. Una variedad de conceptos se han aplicado al modelado de sequías, que van desde enfoques simplistas a modelos más complejos. Es importante comprender diferentes métodos de modelización, así como sus ventajas y limitaciones. Se necesita más investigación para entender la complejidad espacio-temporal de las sequías bajo el cambio climático debido a los cambios en la variabilidad espacio-temporal de las precipitaciones. Las aplicaciones basadas en los modelos acoplados para la caracterización de la sequía multivariante parecen ser prometedores para una mejor caracterización de la sequía (Mishra and Singh, 2011).

A lo largo de su historia, México ha padecido los efectos negativos de las sequías, desde la época prehispánica hasta la actualidad, tal como lo muestran los registros documentados durante las diversas etapas del desarrollo nacional (Florescano, 2000; García, 1993). Algunas de ellas se han documentado a partir de una revisión histórica, documental y hemerográfica. Las primeras explicaciones del fenómeno fueron religiosas ante sucesos que rebasaban la comprensión cotidiana, atribuyéndolos a fuerzas divinas; de manera paulatina, la generación de conocimiento e información llevó a explicaciones científicas con base en la observación y análisis (Domínguez, 2016).

La sequía es un evento natural que ocurre de manera recurrente en México, la mayor parte de su territorio tiene características de aridez y crecimiento urbano con patrones de consumo inadecuados. Los problemas de desabastecimiento de agua para consumo

humano tienden a agravarse, aun sin considerar los efectos de la sequía y del cambio climático. Es así que el cumplimiento al mandato constitucional de garantizar el acceso humano al agua está en riesgo. Por otro lado, la seguridad alimentaria nacional es un tema prioritario frente a una sequía extendida y prolongada, donde es trascendental tomar medidas de política social, económica y fiscal para garantizar el abasto de alimentos en el país, potenciar las capacidades productivas del sector rural y definir los cupos de importación de granos básicos, en particular de frijol y maíz blanco para consumo humano (Arreguín *et al.*, 2016).

En México el fenómeno *El Niño* tiene serias repercusiones. En general se puede decir que las lluvias de invierno se intensifican y las de verano se debilitan. En la zona centro y norte del país se incrementan los frentes fríos en invierno, en tanto que en verano aparece la sequía y disminuyen el número de huracanes en el Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México (Magaña *et al.*, 1998 y 2008; Magaña, 2004 y 2005).

Asimismo, las sequías se manifiestan con mayor impacto y frecuencia en la porción norte del país (Magaña, 2004), debido a que es más vulnerable a sus ocurrencias (Velasco, 2002). En la zona noroeste del país, que incluye al Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN), la estadística de lluvias define claramente los períodos de baja precipitación, que pueden extenderse por cinco, seis y hasta siete años consecutivos, como las ocurridas recientemente en los períodos 1997-2004 y 2010-2012 (Sanz *et al.*, 2012). Esta última, se considera la peor sequía en siete décadas y se estima que originó pérdidas mayores a 16 mil millones de pesos, según el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA). La Comisión de Agricultura de la Cámara de Diputados de México (2014) estimó un costo de 150 mil millones de pesos en todo el país. La sequía afectó un 90% del territorio nacional. Prácticamente todo el país se encontraba con algún grado de sequía. Los estados más afectados fueron Aguascalientes, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Jalisco, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora y Zacatecas. A pesar de todas las carencias existentes y de que las medidas adoptadas fueron reactivas, algunos la consideran la mejor atendida en el país, ya que hubo coordinación intersecretarial (Arreguín *et al.*, 2016).

En el ámbito del OCPN se registran recurrentemente los efectos de las sequías de diferente magnitud e intensidad; algunas de ellas, como la ocurrida en el período 2011-2012 han afectado seriamente a esta región en los sectores económicos, social y ambiental. Durante este período se presentaron sequías meteorológicas e hidrológicas extremadamente severas (CONAGUA, 2013), teniéndose escurrimientos prácticamente nulos en ríos y arroyos, así como muy bajos volúmenes de almacenamiento en las principales presas de la región (CONAGUA, 2012). Así mismo, se coincidió con una de las peores heladas que se han presentado en el noroeste de México, lo que provocó el siniestro de más de 800.000 hectáreas de diferentes cultivos, principalmente el maíz; generando un grave problema socioeconómico. Para afrontar los efectos de la helada se llevó a cabo la resiembra de cientos de miles de hectáreas, disponiendo del agua almacenadas en las presas que eran destinadas para riegos normales posteriores, generando con ello una sequía hidrológica no natural, que se vio agravada por la presencia de la sequía natural de dicho período, llevando a las presas a su mínimo de almacenamiento histórico de entre un 3% y 9% de su capacidad de almacenamiento en junio de 2012; (Ravelo, 2012; Ravelo *et al.*, 2014; Torrecillas *et al.*, 2013). Los porcentajes de almacenamiento más pequeños fueron en las presas del Consejo de Cuenca de los Ríos Mocarito al Quélite, principalmente la presa Sanalona que llegó a estar prácticamente seca; seguido de los almacenamientos de las presas del Consejo de Cuenca de los ríos Fuerte y Sinaloa.

## **DEFINICIONES, ENFOQUES, ESTUDIOS E ÍNDICES**

Como resultado de la revisión bibliográfica, se tiene lo siguiente: Existen muchos artículos, que presentan diversas herramientas metodológicas creadas para cuantificar los diferentes tipos de sequía existentes: meteorológicas, agrícolas, hidrológicas y socioeconómicas, haciéndose notar la dificultad de utilizar el mismo umbral de déficit pluviométrico en dos lugares diferentes, debido a la diversidad climática existente en el planeta (Valiente, 2001). Así mismo, se ha creado otro tipo de sequía que tiene que ver con el impacto de la sequía en el medio ambiente, llamado sequía ecológica (NDMC, 2016). También ha sido notable el incremento en las investigaciones sobre sequía en todas las partes del mundo, con la incorporación de nuevos índices puntuales y espaciales obtenidos

a partir de imágenes satelitales, sobre todo las investigaciones desarrolladas por los investigadores chinos en este último lustro.

## **DEFINICIONES Y TIPOS DE SEQUÍA**

La sequía es un fenómeno natural tan complejo que no tiene una definición única universal, si no que depende de quién y para qué se defina; existen diversos autores (Dracup, 1980; Escalante, 2002; Marcos, 2001; Velasco, 2002; Ravelo, 2007; Douriet, 2010) que han realizado un buen compendio de clasificación y definición de sequías. Una mayor explicación sobre este tema puede verse en la bibliografía recomendada. No obstante, a continuación se hace una breve descripción de lo que se considera más importante para este trabajo.

Actualmente existen más de 150 definiciones operacionales de sequía (Wilhite y Glantz, 1985). Las cuales dependen principalmente de las perspectivas de los usuarios y gestores del agua. Sin embargo el éxito de la gestión del agua para hacer frente a la sequía requiere la comprensión de los procesos que la rigen y sus causas (NDMC, 2016), las cuales se categorizan en cuatro grupos: meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica (Heim, 2002), ver Figura 1.1, entre más tiempo dura la escasez de la lluvia con respecto a la normal, más severa es la sequía y los impactos económicos, sociales y ambientales son mayores. Los distintos tipos de sequía se describen brevemente a continuación:

**Sequía Meteorológica:** Ocurre cuando las precipitaciones empiezan a escasear, la evapotranspiración se hace mayor hasta llegar a extrema y otros factores meteorológicos como las altas temperaturas inciden en la humedad del suelo y sus características se ven afectadas por la disminución de la humedad, levantando tolvaneras por los vientos calientes y agrietamiento de los suelos. Se define usualmente sobre la base del grado de sequedad (en comparación con alguna cantidad "normal" o media) y la duración del período seco. Las definiciones de sequía meteorológica deben considerarse como

específicas de la región, ya que las condiciones atmosféricas que dan lugar a deficiencias de precipitación son muy variables de una región a otra.

**Sequía Agrícola:** Se presenta cuando la escasez de agua se alarga en el tiempo provocando déficit de agua o de humedad en el suelo a tal grado que provoca daños por estrés hídrico en los cultivos. La sequía agrícola vincula diversas características de la sequía meteorológica (o hidrológica) con los impactos agrícolas, centrándose en la escasez de precipitaciones, las diferencias entre la evapotranspiración real y potencial, el déficit hídrico del suelo, la reducción de los niveles de las aguas subterráneas o de los embalses, etc. Una buena definición de la sequía agrícola debe ser capaz de explicar la susceptibilidad variable de los cultivos durante las diferentes etapas del desarrollo del cultivo, desde la emergencia hasta la madurez.

**Sequía Hidrológica:** Aparece cuando la escasez de agua continúa en el tiempo reduciendo los caudales en los arroyos y los ríos, bajan los niveles de los embalses y lagunas naturales y disminuyendo las recargas en los acuíferos profundizándose los niveles estáticos. La sequía hidrológica se asocia con los efectos de los períodos de precipitación (incluyendo nevadas) en el suministro de agua superficial o subterránea (es decir, caudal de agua, reservorio y niveles de los lagos, agua subterránea). La frecuencia y gravedad de la sequía hidrológica a menudo se define en una cuenca hidrográfica o cuenca. La competencia por el agua en estos sistemas de almacenamiento se intensifica durante la sequía y los conflictos entre los usuarios de agua aumentan significativamente.

**Sequía socioeconómica:** Las definiciones socioeconómicas de la sequía asocian la oferta y la demanda de algunos bienes económicos con elementos de sequía meteorológica, hidrológica y agrícola. Se diferencia de los tipos de sequía antes mencionados porque su ocurrencia depende de los procesos de tiempo y espacio de la oferta y la demanda para identificar o clasificar las sequías. La sequía socioeconómica ocurre cuando la demanda de un bien económico excede la oferta como resultado de un déficit climático relacionado con el suministro de agua.

Además, recién el National Drought Mitigation Center incorporo la definición de sequía ecológica (NDMC, 2016), que se enuncia a continuación:

**Sequía ecológica:** Un esfuerzo más reciente se centra en la sequía ecológica, definida como "un déficit prolongado y generalizado en los suministros de agua naturalmente disponibles (incluyendo los cambios en la hidrología natural y gestionada) que crean múltiples tensiones a través de los ecosistemas". A medida que las temperaturas mundiales continúan aumentando, se espera que la intensidad y frecuencia de tales sequías ecológicas aumente, lo que dará lugar a una amplia gama de impactos sociales y ecológicos.

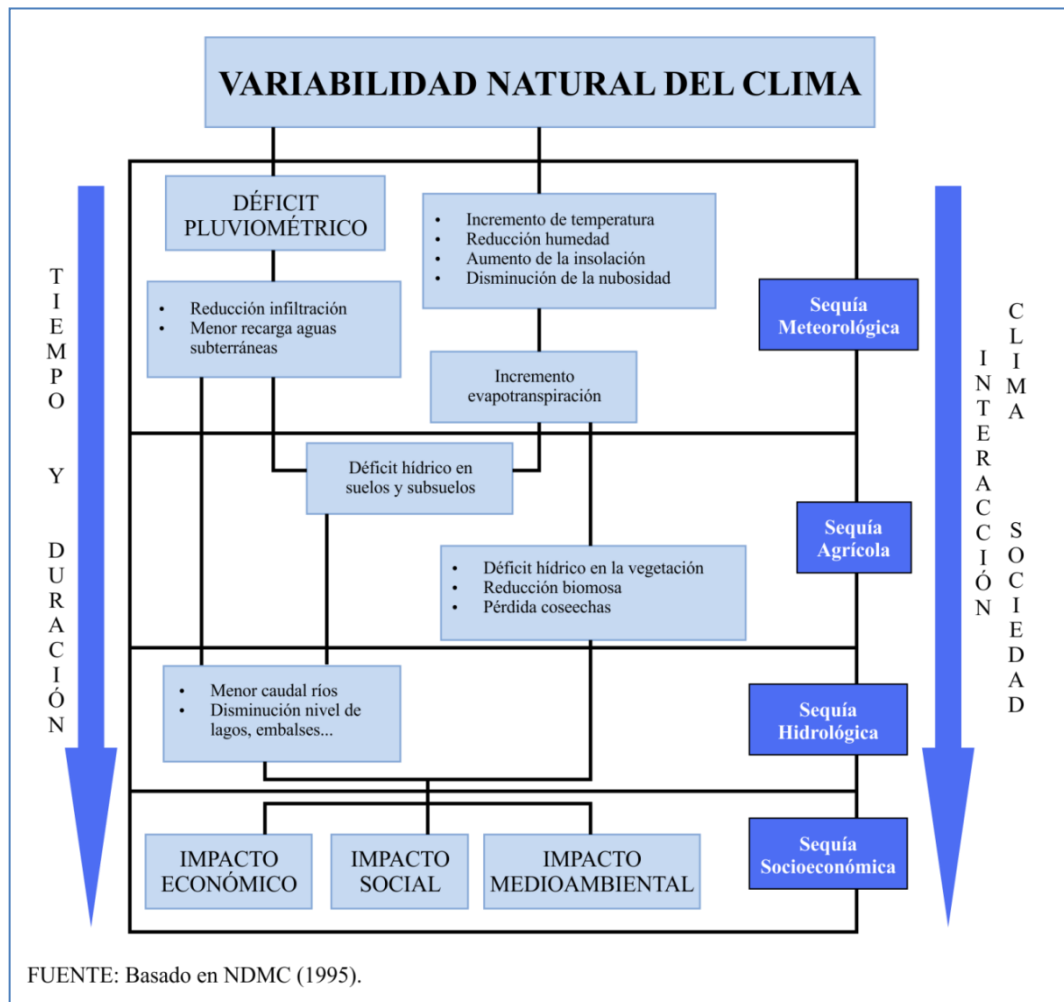


Figura 1.1. Secuencia de la ocurrencia de sequías y sus impactos para los tipos de sequía comúnmente aceptados. (Adaptada de NDMC, 2016, <http://drought.unl.edu>).

## DEFINICIÓN ADOPTADA DE SEQUÍA

La definición de sequía que se ha adoptado para este trabajo es:

“La sequía es un fenómeno natural que ocurre cuando la precipitación y la disponibilidad del agua en un periodo de tiempo y en una región dados, es menor que el promedio histórico registrado, y cuando esta deficiencia es lo suficientemente grande y prolongada como para dañar las actividades humanas y los ecosistemas” (adaptada de Velasco, 2002; Ravelo 2007; Douriet, 2010).

## ENFOQUES DE SEQUÍA

La sequía puede apreciarse desde diferentes puntos de vista, y en esto al menos podemos distinguir tres (Douriet, 2010; Beran and Rodier, 1985):

- El del *científico*, a quien le interesa probar teorías y metodologías para caracterizar el fenómeno y plantearlo desde un riguroso punto de vista analítico.
- El *tomador de decisiones* o responsable de un sistema hidráulico, preocupado por tener soluciones inmediatas, viables y confiables, para satisfacer los requerimientos de sus diversos usuarios de una manera que no se creen conflictos y que se asegure la permanencia de la fuente de abastecimiento al nivel tal que pueda garantizarse el suministro mínimo al menos por un período razonable.
- El *usuario común* del agua, de cualquier tipo, a quien le preocupa quedarse sin agua para satisfacer sus necesidades, independientemente de lo que les suceda a los demás.

Conciliar estos tres esquemas es una labor ardua y difícil de lograr, por no decir que imposible, y es uno más de los problemas que se aumentan a los de por sí graves del puro fenómeno natural.



## CARACTERÍSTICAS DEL FENÓMENO

Para mitigar los efectos de la sequía, lo más conveniente es tomar medidas preventivas, para ello es necesario caracterizarla y con base en ello analizar los escenarios probables que se pudieran presentar ante la disminución o ausencia de la precipitación, de los escurrimientos superficiales, de la disminución de los volúmenes almacenados en las presas, abatimiento de niveles estáticos de los acuíferos y deterioro de la calidad del agua en cuencas y acuíferos.

De acuerdo con la Figura 1.2, la duración ( $D$ ) de la sequía está en función, entre otros factores, del llamado nivel de truncamiento [ $X_0$ ], referencia a partir de la cual los valores menores representan una deficiencia y probablemente una sequía, medida en términos de la cantidad de lluvia, escurrimiento, etc. Otros dos parámetros importantes del fenómeno son la severidad ( $S$ ) y la magnitud o intensidad ( $I$ ); el primero se refiere al déficit acumulado en todo el periodo, y el segundo al déficit por unidad de tiempo (meses o años); además, la sequía es un fenómeno que abarca amplias extensiones geográficas, sin una dirección o trayectoria definida y sin epicentro (Velasco, 2002; Ravelo, 2007 y 2008; Douriet, 2010).

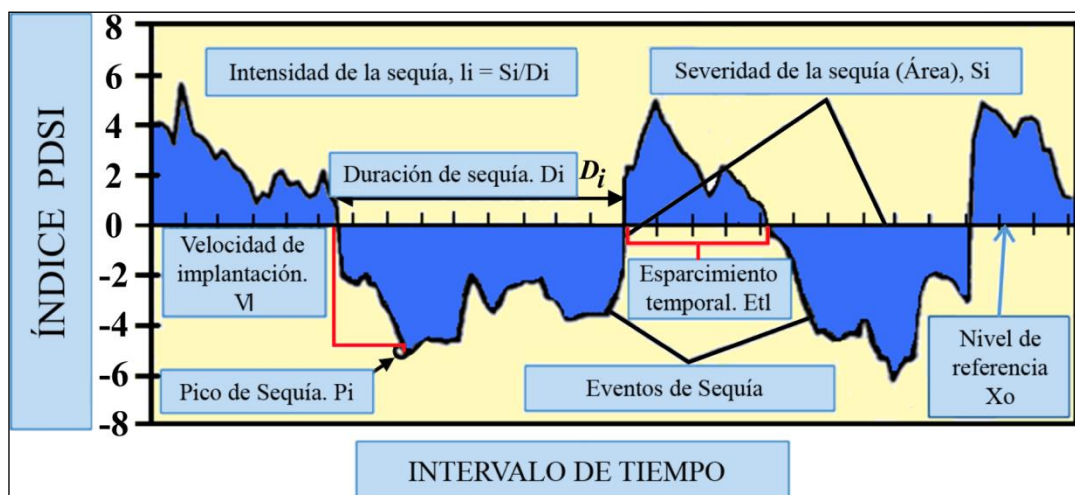


Figura 1.2. Definición de las características de sequías usando PDSI, con nivel de referencia  $X_0=0$ . (Adaptada de Valiente, 2001; Douriet, 2010).

## ESTUDIOS Y EVENTOS SOBRE SEQUÍAS

Entre los trabajos sobre sequías que se han desarrollado en el Mundo, México y el OCPN, que se relacionan con este tema de investigación, sobresalen los siguientes:

- ❖ Kuenzer *et al.*, 2008, desarrollaron el Índice de Déficit de Humedad en Suelos (IDHS) para evaluar la desviación de humedad como un indicador de sequía agrícola, basado en el Índice de Humedad de Suelo (IHS) derivado de la aplicación de un triángulo conceptual entre el LST y el NDVI.
- ❖ Ma *et. al.*, 2015, propusieron un indicador de sequía multivariable basado en datos probabilísticos (SPDI-JDI), a partir del modelo de Palmer y el índice de déficit conjunto propuesto por Kao and Govindaraju (2010), y evaluaron su desempeño comparando sus resultados con observaciones de datos relacionados con la sequía, y con otros indicadores de sequía ya reconocidos.
- ❖ Los investigadores Shin y Salas, en el año 2000, realizaron un análisis regional de sequías basado en redes neuronales, cuyo objetivo fue el desarrollo de una tecnología para analizar y cuantificar los patrones temporales y espaciales de las sequías meteorológicas basadas en datos de precipitación anual, usando algoritmos de redes neuronales no paramétricos.
- ❖ En el año 2001, Dawson y Wilby, llevaron a cabo trabajos de modelación hidrológica usando redes neuronales artificiales (RNA) en la modelación y pronóstico de avenidas. En su artículo muestran los principios básicos de la modelación por RNA, la arquitectura de trabajo de las redes y los algoritmos de entrenamiento. Discuten las relaciones entre los temas de la división y procesamiento de datos para la calibración y validación del modelo, las técnicas de estandarización de datos, y los métodos de evaluación del desarrollo del modelo RNA.
- ❖ Kim, Valdés y Aparicio (2002) llevaron a cabo el trabajo Frequency and Spatial Characteristics of Droughts in the Conchos River Basin, México, en el cual usaron el índice de Severidad de Sequías de Palmer (PDSI), para determinar las características de sequías en la cuenca del río Conchos, tributario del río Bravo. Con las características temporales y espaciales de la sequía obtenidas mediante el

PDSI crearon las curvas intensidad-área-frecuencia que puede ser útil para determinar la severidad de una sequía en la cuenca.

- ❖ Velasco (2002) en su tesis doctoral Plan de Preparación para Afrontar las Sequías en un Distrito de Riego, utiliza el índice SPI a diferentes escalas de tiempo para el monitoreo de las sequías en las cuencas de los ríos Conchos y San Pedro; así mismo, propone un plan de preparación para afrontar las sequías en el Distrito de Riego 05 Delicias, Chihuahua, compuesto de 10 fases.
- ❖ En el año 2003, los investigadores Kim y Valdés, presentaron su trabajo A Nonlinear Model for Drought Forecasting based on Conjunction of Wavelet Transforms and Neural Networks. En él muestran los modelos que fueron aplicados en el pronóstico de sequías para el río Conchos, en México, tributario del río Bravo. Como resultado resaltan el hecho que la conjunción de ambos modelos mejora el pronóstico de sequías regionales mediante índices como PDSI.
- ❖ The North American Drought Monitor Portal (NADM, 2016). <https://www.drought.gov/nadm/content/2016-nadm-workshop>. Este monitor es de gran escala, aplicable a Canadá, USA y México, usa varios índices para el monitoreo y evaluación de sequías; el inconveniente que tiene es que su gran escala no permite evaluar con precisión la sequía por cuenca.
- ❖ Morid *et al.*, (2007) desarrollaron el Trabajo Drought forecasting using artificial networks and time series of drought índices, en donde consideran al pronóstico como un componente crítico del riesgo de sequías, por lo que desarrollan un método para el pronóstico de sequías, usando redes neuronales artificiales (RNA) y los índices de sequía efectiva (EDI) y el índice estandarizado de precipitación (SPI). Los modelos finales de pronóstico han sido utilizados para el sistema de alertamiento temprano por sequías en Irán.
- ❖ Pandey *et al.*, (2007) realizaron un estudio de caracterización de sequías mediante índices en el distrito KBK en Orissa (India), utilizando un sistema de monitoreo de sequías mediante los índices SPI, EDI y Deciles para el análisis temporal y un sistema de información geográfica, concluyen que las sequías ocurren cuando la relación entre la lluvia acumulada anual y la evapotranspiración potencial es menor a 0,6, y que EDI es el índice que mejor representa la sequía en esa zona en estudio.

- ❖ Ravelo A.C., 2007-2012. Como parte del desarrollo de un sistema de pronóstico de sequía aplicado a la cuenca del río Culiacán, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) a través del proyecto PREMIA y en coordinación con la Subdirección General Técnica de la CONAGUA, capacitó a personal del OCPN y otras entidades gubernamentales a nivel estado de Sinaloa y municipios, que conforman el Grupo de Monitoreo y Evaluación de las Fases de la Sequías (GMEFS), mediante cursos y talleres aplicados que por su importancia en este trabajo se describen brevemente en el punto El Proyecto de sequías en el OCPN.
- ❖ Ravelo *et al.*, (2016) desarrollaron el estudio Monitoreo y Evaluación de las Sequías en América Central, Estudio de Caso: Corredor seco de El Salvador, Honduras y Nicaragua, dentro de la Serie de Estudios Temáticos EUROCLIMA-acción en desertificación, degradación de tierras y sequías (DDTS). Se publicó como reporte Técnico del Joint Research Centre de European Commission. JRC Science Hub, <https://ec.europa.eu/jrc>. JRC102117, EUR27974ES. ISBN9789279594106. En este trabajo se utilizaron los índices SPI, PDSI, CMI y el índice de radiación fotosintéticamente activa (fAPAR) y se creó in situ un Sistema Operativo de Sequías para el monitoreo y evaluación de la sequías en dicha región. Es conveniente mencionar la participación del OCPN en representación de CONAGUA, México. [www.researchgate.net/publication](http://www.researchgate.net/publication).
- ❖ Estadías doctorales en el CREAM de la UNC para la capacitación en el tema de redes neuronales y desarrollo de los documentos finales “Pasantías en Aplicación de redes neuronales en índices de sequías, Caso de Estudio: Organismo de Cuenca Pacífico Norte”, (Douriet, 2014) y “Pasantías en Validación de redes neuronales en índices de sequías, Caso de Estudio: Organismo de Cuenca Pacífico Norte”, (Douriet, 2015), en donde se desarrollaron los elementos para el pronóstico y validación de las sequías hidrológicas mediante redes neuronales aplicadas a volúmenes de escurrimiento mensuales, variables climatológicas y el índice de escurrimiento SDI.
- ❖ Ravelo *et al.*, (2014) desarrollaron el Proyecto de Sequías del OCPN, México, para el monitoreo, evaluación y pronóstico de sequías en dicha región mediante los índices SPI, PDSI, NDVI, para sequías meteorológicas y agrícolas y SDI para sequías hidrológicas. Se aplicaron y validaron las redes neuronales para el

pronóstico de los índices a uno, dos y tres meses; así mismo, se desarrolló in situ el Sistema Operativo de Sequías (SOS) para el monitoreo y pronóstico de las sequías en el OCPN.

- ❖ Sanz *et al.*, (2012) presentaron los resultados del monitoreo de la sequía 2011-2012 en la RH10-OCPN, mediante los índices SPI y PDSI utilizando el Sistema Operativo de Sequías (SOS) creado durante las consultorías de la OMM. natural deriva de la escasez de precipitaciones en este período.
- ❖ Douriet (2010) desarrolla el trabajo. Caracterización y evaluación de escenarios por sequía en la cuenca y acuífero del Río Culiacán. Tesis de Maestría. IMTA.

## ÍNDICES DE SEQUÍAS

Hay tres índices de sequía efectivos que son usados ampliamente como el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), el Índice de Severidad de Sequías Palmer (PDSI) y Índice de Evapotranspiración Precipitación Estandarizado (IEPE) los cuales son calculados con información meteorológica in situ. El SPI tiene varias características nuevas relativas a índices previos, incluyendo su simplicidad y flexibilidad temporal que permite la aplicación del monitoreo de sequías en todas las escalas de tiempo. Por lo tanto, es aceptado por investigadores y gobiernos (Zhao and Running, 2010), (Beguería *et al.*, 2010), (Heim, 2002), (Yao *et al.*, 2011), (McKee *et al.*, 1993), (Palmer, 1965), (Guttman, 1999) y (Serrano *et al.*, 2010).

El método SPI fue presentado en 1993 por McKee *et al.*, (1993) y se utilizó para definir y analizar las sequías por primera vez en el estado de Colorado. SPI también se aplicó por Hayes *et al.*, (1999), Serrano *et al.*, (2004), Bordit *et al.*, (2004), Szalai and Bella (2004), Paulo *et al.*, (2005) y Ravelo *et al.*, (2014) para la evaluación de la sequía en diferentes regiones, y se presenta como una escala adecuada para un estudio de la sequía, su estimación implica el ajuste de una función de densidad de probabilidad (PDF) a las precipitaciones totales para las estaciones de interés. Tiene diferentes interpretaciones en función de su escala de tiempo. Por ejemplo, el SPI a un mes representa las condiciones a corto plazo, y su aplicación puede estar relacionada estrechamente con la humedad del

suelo; el SPI de tres meses proporciona una estimación estacional de la precipitación; el SPI a seis y nueve indica tendencias a mediano plazo en los patrones de precipitación; y el SPI a doce meses refleja los patrones de precipitación a largo plazo, por lo general vinculados a los flujos de corriente, niveles de los embalses, e incluso los niveles de agua subterránea (NDMC, 2007).

El PDSI, como una medida de sequía meteorológica, es uno de los índices de sequía climáticas más comúnmente utilizados en los Estados Unidos (Palmer, 1965). Este índice tiene en cuenta la duración y severidad de una temporada húmeda o seca (Heddinghaus and Sabol 1991). Este índice se modificó por el Centro Nacional de Análisis Climático y Servicio Meteorológico para obtener el ISSP índice modificado (ISPM), el cual es la versión operativa del PDSI que en su cálculo toma en cuenta la suma de los términos húmedo y seco después de que han sido ponderados por sus probabilidades (Heim, 2002). Con base en el balance de agua mensual definido por el esquema de sequía de Palmer, Ma *et al.*, (2015) modificaron la estandarización del PDSI usando el modelo matemático del SI (índice de sequía estandarizado), obteniendo el PI en un nuevo índice a escala multitemporal, conocido como el índice de sequía estandarizado de Palmer (SPDI). El índice de sequía de Palmer (PI), consiste en un conjunto de índices, incluyendo el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI; Palmer, 1965), el índice de sequía modificado de Palmer (PMDI; Heddinghaus and Sabol, 1991), el índice hidrológico de sequía de Palmer (PHDI; Karl *et al.*, 1987), y el índice Z de Palmer (ZIND; Karl, 1986).

Otros índices creados y utilizados en la evaluación de las condiciones de las sequías en áreas particulares para la planeación de los recursos del agua, son: el Índice Normalizado de Flujo (SDI) creado por Nalbantis en 2008, el Índice de Reconocimiento de Sequías (IDS) y el Índice de Estado de las presas Ie (MMAE, 2005). Estos índices han sido desarrollados para evaluar el déficit de suministro de agua en relación con el tiempo de la duración de la escasez de precipitación. Sin embargo, las características de las sequías en diferentes zonas climáticas pueden ser diferentes. Aplicaciones de éstos y otros índices se encuentran en: (Rossi *et al.*, 2007); (NFI; Gosling, 2014), (RDI; Tsakiris and Vangelis, 2005; Rahmat *et al.*, 2015), (PDSI; Palmer, 1965, Bordi and Sutera, 2007), Index (SPI; Mckee *et al.*, 1993; Zhang *et al.*, 2012; Portela *et al.*, 2015), (Jiang and Shi, 2003;

Shankman *et al.*, 2006; Guo *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2011; Zhao *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2015); (Carrao *et al.*, 2013).

Con el objetivo de cuantificar las sequías y definir su intensidad y grado de severidad se utilizan distintos índices basados en información satelital (Ravelo *et al.*, 2004), entre los principales se encuentran: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y el FAPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation). Estos índices han sido desarrollados y utilizados de forma efectiva para detectar y monitorear sequías. El NDVI se empezó a aplicar en el OCPN en el año 2007, teniendo como piloto la cuenca del río Culiacán (Ravelo, 2007) y el FAPAR se ha aplicado recientemente en el Monitoreo y Evaluación de las Sequías en América Central, Estudio de Caso: Corredor seco de El Salvador, Honduras y Nicaragua (Ravelo *et al.*, 2016), en donde las imágenes fueron facilitadas por el Observatorio Latino Americano de Sequías (SCADO, 2013) del JRC (Joint Research Center, European Commission), desarrollado en la primera fase (2010-2013) del Programa EUROCLIMA, (Barbosa, 2015). <http://edo.jrc.ec.europa.eu/scado>.

Para el desarrollo de esta investigación se han seleccionado los índices SPI, PDSI y NDVI para el monitoreo y pronóstico temporal y espacial de la sequía meteorológica, y el SDI e Ie para el monitoreo y pronóstico temporal puntual de la sequía hidrológica.

## **MONITOREO, EVALUACIÓN Y PRONÓSTICO DE SEQUÍAS**

### **MONITOREO, EVALUACIÓN Y SISTEMAS OPERATIVOS DE SEQUÍAS**

Actualmente no existen mecanismos que puedan evitar la ocurrencia de sequías, pero es posible, mediante el análisis de datos climáticos, meteorológicos e hidrológicos, obtener información que permita preparar planes de contingencia en el caso de ocurrencia de sequía. Un sistema de monitoreo, seguimiento y evaluación de las sequías puede proveer valiosa información para la planificación de acciones de alerta temprana y mitigación de los fenómenos de sequía. Dicho sistema deberá integrar al conjunto de los aspectos ambientales y socio-económicos que deben ser adecuadamente considerados para lograr un uso sustentable del recurso agua. Unos de los componentes más importantes para la correcta operación del sistema integrado de sequías es disponer de personal capacitado en los aspectos científicos y técnicos. (Ravelo *et al.*, 2016; Ravelo *et al.*, 2014; Ravelo, 2008, Velasco, 2002).

Un aspecto importante del monitoreo de la sequía y el desarrollo de un sistema de alerta temprana es la capacidad de predecir con eficacia los futuros episodios de sequía. La previsión de futuros episodios de sequía en una región es muy importante para la búsqueda de soluciones sostenibles para la gestión del agua y la evaluación del riesgo de ocurrencia de sequías (Bordi y Sutera, 2007).

En la actualidad, muchos países poseen sistemas operativos para la detección, evaluación y mitigación de las sequías. La reciente conferencia sobre las sequías en Valencia (España) en 2015 y el International Expert Symposium “Coping with Droughts” ‘Building a Community of Practice on Drought Management Tools’, en Santiago (Chile) en 2014, reflejan la activa participación europea y de varios países a nivel mundial en las investigaciones y actividades relacionadas a la adversidad climática (ICD, 2015; Planchuelo 2015), (UNESCO, 2014; Ravelo y Douriet, 2014).



Como ejemplos de sistemas operativos para la detección, evaluación y mitigación de sequías funcionales en el mundo, se tienen entre los más conocidos e importantes al Monitor de Sequía de América del Norte (NADM, por sus siglas en inglés) resultado de la cooperación técnica entre expertos de sequía de México, Estados Unidos y Canadá, que tiene como objetivo describir las condiciones de sequía en América del Norte. Se basa en el éxito del Monitor de Sequía de los Estados Unidos (USDM) que utiliza una metodología basada en el análisis de diversos índices o indicadores de sequía propuesta en 1999; y de donde se apoya el Monitor de Sequía en México (MSM). Con estos monitores se analizan condiciones de gran escala, por lo que las condiciones locales pueden variar (Svoboda *et al.*, 2002; Hayes *et al.*, 2005). <http://drought.unl.edu/dm>. <http://smn.cna.gob.mx>. Otro monitor de gran escala es el Latin American Flood and Drought Monitor (LAFDM, por sus siglas en inglés), con el cual se puede visualizar las condiciones históricas y actuales de las condiciones diarias y las previsiones meteorológicas e hidrológicas mensuales para toda América Latina. Su limitante es la gran escala a la que se maneja por lo que las condiciones locales pueden variar (<http://stream.princeton.edu/LAFDM/WEBPAGE>).

Otro ejemplo de monitor a gran escala es el Observatorio de la Desertificación, la Degradación de las Tierras y la Sequía (DDTS) de América Latina (SCADO, 2013) del JRC (Joint Research Center, European Commission), desarrollado en la primera fase (2010-2013) del Programa EUROCLIMA, (Barbosa, 2015) [<http://edo.jrc.ec.europa.eu/scado>]. El SCADO suministra los datos, informaciones y herramientas necesarios para un análisis exhaustivo del fenómeno de la sequía y el problema de la degradación de las tierras y la desertificación en América Latina. Su objetivo es facilitar la integración de las estrategias y medidas de mitigación y de adaptación ante el cambio climático, en las políticas y planes públicos de desarrollo en América Latina. Una red de instituciones latinoamericanas apoya al desarrollo del Observatorio EUROCLIMA de la DDTS y contribuye al servidor web cartográfico con sus propios productos desarrollados a escalas nacionales y/o locales, como es el caso del CREAN con productos de su sistema de monitoreo y evaluación de las sequías en Argentina y el OCPN de la CONAGUA, que contribuye con los productos de su Sistema Operativo de Sequías. Mediante la liga <http://edo.jrc.ec.europa.eu/scado>, se puede tener acceso a mapas y servicios de datos.

El Sistema de monitoreo y evaluación de las sequías en Argentina, desarrollado en el CREAN (2016), genera varios índices que permiten detectar y evaluar las sequías a nivel regional, provincial y nacional. Entre las aplicaciones del monitoreo y evaluación de las sequías están los análisis económicos de las pérdidas en el sector agrícola y las recomendaciones de mecanismos de adaptación y mejoramiento del uso del agua en períodos de deficiencias hídricas, (Ravelo *et al.*, 2016). Las actividades desarrolladas a escala provincial y nacional está dirigida a reducir los impactos negativos de las sequías y aumentar la resiliencia de las comunidades más vulnerables. Se dispone de información actualizada, oportuna y confiable sobre la distribución geográfica de las sequías, así como su duración e intensidad, la cual es de importancia para la toma de decisiones y el establecimiento de mecanismos de mitigación y respuesta a la adversidad climática (<http://www.crean.unc.edu.ar>).

El Sistema Operativo de Sequías (SOS) del OCPN-CONAGUA fue creado durante las consultorías de la OMM a través del Proyecto para el Fortalecimiento del Manejo Integrado del Agua (PREMIA), para el monitoreo, evaluación y pronóstico temporal y espacial de las sequías meteorológicas e hidrológicas mediante los índices SPI, PDSI, CMI, NDVI y SDI a escala de cuenca. Una de las características de este sistema es su manejo a baja escala a nivel de cuenca, lo que permite mayor precisión en la estimación de las características puntuales y espaciales de la sequía; así como su estimación de vulnerabilidad y riesgo por municipio, cuenca y Consejo de Cuenca. Se puede ver mayor información sobre el proyecto de sequías y el SOS del OCPN en el punto El Proyecto de sequías en el OCPN.

Recientemente se creó el Sistema Operativo de Sequías para el monitoreo y evaluación de las sequías en el Corredor seco de El Salvador, Honduras y Nicaragua (Ravelo *et al.*, 2016) utilizando los índices SPI, PDSI, CMI y el FAPAR.

En la actualidad se encuentran disponibles boletines agro-meteorológicos que evalúan los episodios de ocurrencia de sequías en distintas partes de Latinoamérica. Como por ejemplo, los que figuran en los portales de entidades relacionadas con los servicios

meteorológicos, de manejo de recursos hídricos o agrícolas de las siguientes instituciones que tratan la evaluación de las sequías.

CREAN: [http://www.crean.unc.edu.ar/secciones/monitoreo/monitoreo\\_intro.html](http://www.crean.unc.edu.ar/secciones/monitoreo/monitoreo_intro.html).

Córdoba, Argentina

CONAGUA: <http://www.conagua.gob.mx/OCPN07/Noticias/Boletin>.

Culiacán, México

Observatorio Ambiental: <http://mapas.snet.gob.sv/meteorologia/decadico.pdf>.

El Salvador.

## **PRONÓSTICO DE SEQUÍAS**

El conocimiento anticipado de las características del fenómeno es esencial para establecer medidas de mitigación, adaptación y enfatizar la resiliencia de la sociedad por parte de las acciones de los sectores públicos y privados de cada país. Por estas razones, un sistema de monitoreo, evaluación y pronóstico de las sequías puede ser utilizado para la planificación de acciones de alerta temprana y mitigación de los impactos de la sequía (Ravelo *et al.*, 2014). Dicho sistema deberá integrar al conjunto de los aspectos ambientales y socio-económicos que deben ser adecuadamente considerados para lograr un uso sustentable del recurso agua. Unos de los componentes más importantes para la correcta operación del sistema integrado de sequías es disponer de personal capacitado en los aspectos científicos y técnicos (Ravelo *et al.*, 2016).

Se reconoce ampliamente que una mitigación efectiva de los impactos de las sequías más adversas es posible mediante la capitalización de la demora por lo general importante entre el inicio de sequía (es decir sequía meteorológica) y el momento en que sus consecuencias son percibidas por los sistemas de abastecimiento de agua y los usuarios finales (es decir, los impactos socioeconómicos de la sequía). Con este fin, un sistema de vigilancia de la sequía y la previsión, capaz de avisar rápidamente frente a un fenómeno incipiente y seguir su evolución en el espacio y el tiempo, representa la condición previa

para una estrategia exitosa de mitigación (Rossi, 2003), (Ravelo, 2012), (Torrecillas, *et al.*, 2013 y 2015), (CONAGUA, 2012a).

La sequía puede pronosticarse mediante las variables de sequía (Hastenrath and Greischar, 1993; Chiew *et al.*, 1998; Cordery and McCall, 2000) o indicadores de sequía (Nicholls, 1985; Mishra and Desai, 2005; Cancelliere *et al.*, 2007; Vasiliades and Loukas, 2008). Una variable de sequía es un elemento clave que define la sequía, tal como la precipitación, la humedad del suelo, evapotranspiración o escurrimiento. Un indicador de la sequía es una medida utilizada para cuantificar y caracterizar las condiciones de sequía.

## **MÉTODOS DE PRONÓSTICO DE SEQUÍAS**

Se han propuesto muchas técnicas estadísticas y no estadísticas para pronosticar sequías (Bonaccorso *et al.*, 2012). Independientemente de la metodología específica, una distinción se puede hacer con referencia al objetivo de la previsión. Por un lado, el interés puede estar en el pronóstico de los valores futuros de la variable hidrometeorológica o índice de sequía bajo investigación. Por otro lado, el objetivo puede estar en la determinación de las probabilidades de transición de una fase de sequía dada (expresada en términos de una variable de severidad de la sequía o el índice) a otra en el futuro (Bonaccorso *et al.*, 2015).

Muchos de los modelos de predicción de sequía se han desarrollado en los últimos años; (Mishra and Singh 2010 y 2011); uno de ellos, utilizado para la predicción de un índice de sequía, hace uso de sus propios valores pasados (Panu and Sharma, 2002; Mishra and Desai, 2005; Mendicino *et al.*, 2008). Por ejemplo Cancelliere *et al.*, (2005), pronosticaron los valores del índice de precipitación estándar (SPI) usando una matriz de auto covarianza de la serie temporal SPI; Ravelo *et al.*, (2014) aplicaron las RNA en el pronóstico de índices meteorológicos puntuales (SPI, PDSI) para la cuenca del Río Culiacán (Ravelo, 2008) y la Región Hidrológica No. 10 (Ravelo, 2012) del OCPN y mediante interpolación se prospecto la variabilidad espacial de la sequía. El primer enfoque implica la cuantificación de una relación entre los valores presentes y pasados del

índice ajustando los datos a un modelo de serie temporal, caso de la predicción de índices meteorológicos; y el otro enfoque es predecir el índice como una función de los valores pasados de sus variables de predicción, que es el caso de aplicación de las redes neuronales artificiales en la predicción de sequías hidrológicas de este trabajo de investigación.

Debido a que la mayoría de las disciplinas de observación tienden a inferir propiedades de un sistema con incertidumbre a partir del análisis de los datos dependientes del tiempo, las tecnologías analíticas para la extracción de las características significativas de tiempo de datos de series tienen algunas limitaciones inherentes, que han sido un tema ampliamente discutido durante mucho tiempo (Jaeger and Haas, 2004; Jothiprakash and Magar, 2012; Nair *et al.*, 2001). Por otra parte, los modelos híbridos son útiles para el pronóstico de la sequía a largo plazo. Mishra *et al.*, (2007), desarrollaron un modelo híbrido, que combina un modelo ARIMA y una red neuronal artificial no lineal para el pronóstico de la sequía. Se encontró que el modelo híbrido puede pronosticar sequías con mayor precisión con un tiempo de espera de hasta 6 meses.

## **REDES NEURONALES EN EL PRONÓSTICO DE SEQUÍAS METEOROLÓGICAS**

Variadas aplicaciones de RNA al pronóstico de sequías meteorológicas se encuentra en la literatura. Por ejemplo: Morid *et al.*, (2007), emplearon diferentes modelos de RNA para el Índice de Sequía Efectivo y SPI para pronosticar la sequía en varias estaciones de precipitación en la provincia de Teherán, Irán. (Rezaeian-Zadeh and Tabari, 2012). Recientemente, se han hecho algunos esfuerzos para analizar el papel del SPI para el pronóstico de la sequía, así como para estimar las probabilidades de transición entre las fases de sequía del SPI y del PDSI (Bonaccorso, Cancelliere y Rossi, 2015), (Ravelo, 2009, 2010 y 2011). Morid *et al.*, (2007), desarrollaron un método para pronosticar las sequías utilizando una RNA. Los índices utilizados fueron el índice de sequía efectiva (EDI) y SPI. Las previsiones se realizaron utilizando diferentes combinaciones de precipitaciones pasadas, EDI, y SPI en los meses anteriores y los índices climáticos, tales como el índice de Oscilación del Sur (SOI) y el índice de Oscilación del Atlántico Norte (NAO); demostraron que los pronósticos utilizando EDI fueron superiores a los que

utilizan SPI para todos los plazos de ejecución y en todas las estaciones de lluvia. Ravelo, (2012) y Ravelo *et. al.*, (2014), aplicaron las redes neuronales en el pronóstico de sequías meteorológicas mediante los índices estandarizado de precipitación (SPI) y el de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI).

## **REDES NEURONALES EN EL PRONÓSTICO DE SEQUÍAS HIDROLÓGICAS**

Teniendo en cuenta los éxitos reportados en la aplicación de redes neuronales a los problemas hidrológicos (Crespo and Mora, 1993; Smith, 1996), parecería que una red neuronal diseñada adecuadamente puede ser capaz de representar el proceso de precipitaciones (Bodri *et al.*, 2000).

La aplicación de las redes neuronales artificiales (RNA) a diversos aspectos de la modelización hidrológica ha sido objeto de mucha investigación en los últimos años. Este interés ha sido motivado por la naturaleza compleja de los sistemas hidrológicos y la capacidad de las redes neuronales para modelar relaciones no lineales. Aunque los modelos deterministas se esfuerzan para dar cuenta de todos los procesos físicos y químicos, el éxito de su empleo puede ser restringido por la necesidad de los datos de captación específica y las simplificaciones que participan en la solución de las ecuaciones gobernantes. El uso de métodos de series de tiempo se puede complicar por la no estacionariedad y la no linealidad en los datos, lo que requiere experiencia y conocimientos del modelista. Las RNA ofrecen un medio relativamente rápido y flexible de modelado, por lo que dichas aplicaciones de RNA son ampliamente reportadas en la literatura hidrológica (Raman and Sunilkumar, 1995; Maier and Dandy, 1996; Loke *et al.*, 1997; Shamseldin *et al.*, 1997; Zhang and Stanley, 1997; Brion and Lingireddy, 1999; Shin and Salas, 2000; Dawson and Wilby, 2001; Kim and Valdés, 2003; Hu *et al.*, 2005; Morid *et al.*, 2007; Mutlu *et al.*, 2008; Heppenstal *et al.*, 2008; Mitall *et al.*, 2012; Pierini *et al.*, 2012; Herrera *et al.*, 2013; Makwana and Tiwini, 2014; Djerbouai *et al.*, 2016).

Debido a la importancia de las RNA en este trabajo de investigación, se desarrolla una sección exclusivamente sobre el estado del arte de las redes neuronales (Estado del arte de las Redes Neuronales).

## **EL PROYECTO DE SEQUÍAS EN EL OCPN**

De manera particular, en el OCPN, los recientes períodos de sequía anteriores a de 2010-2012, como el ocurrido de 1995 a 2002 (CONAGUA, 2008), pusieron de manifiesto la necesidad de contar con recursos humanos calificados y herramientas tecnológicas apropiadas para enfrentar las consecuencias y afectaciones a la población y sus actividades productivas, particularmente la agricultura, de trascendental relevancia en la zona. La necesidad de contar con un Sistema Operativo para la identificación, caracterización, monitoreo y evaluación de escenarios de sequías, mediante modelación, que le permita elaborar planes y/o programas estratégicos de gestión del agua, encaminadas a plantear y ejecutar medidas de contingencia y mitigación de los impactos generados por las sequías, dio origen al desarrollo de las consultorías sobre sequías que brindo la OMM a través del Proyecto PREMIA al OCPN, (OCPN, 2006; Ravelo, 2007). Estas capacitaciones fueron desarrolladas por el consultor de la OMM Dr. Andrés Ravelo, en la ciudad de Culiacán, Sinaloa, con Visitas Técnicas al CREAN de UNC, Argentina y cursos de capacitación internacional en el tema de percepción remota y manejo de imágenes satelitales. Enseguida unan breve descripción de las mismas:

- 1) Curso en Sequía y Conceptualización de un Modelo de Pronóstico de Sequías (Ravelo, 2007).
- 2) Desarrollo de un Sistema Operativo para el Monitoreo, Evaluación y Pronóstico de Sequías (SOS) en el ámbito del Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN/CNA), Área de estudio: Cuenca del Río Culiacán. Producto principal El desarrollo y aplicación del SOS y capacitación a personal del OCPN, (Ravelo, 20008).
- 3) Asistencia Técnica Especializada al Grupo de Monitoreo y Evaluación de las Fases de la Sequía (GMEFS), del Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN/CNA), Área de estudio: Cuenca del Río Culiacán. Revisión y ajuste del SOS, diseño y

presentación del boletín de sequías del OCPN; Visita Técnica al CREAN de la UNC en Argentina con participación en el Seminario Internacional sobre Sequías y Gestión de los Recursos Hídricos: Análisis de la Situación Hídrica en México y Argentina, y propuesta del Plan de Atención de Sequías (PAS), (Ravelo, 2009).

- 4) Sistema Operativo para el Monitoreo, Evaluación y Pronóstico de Sequías en la Cuenca del Río Culiacán. Asistencia Técnica Especializada para el Desarrollo de Planes de Atención de Sequías. Mejoras al boletín de sequías, elaboración de términos de referencia sobre un Programa de Mitigación y Adaptación de Sequías, revisión y corrección de tesis de maestría Caracterización y Evaluación de Sequías en la cuenca y acuífero del Río Culiacán, corrección de propuestas doctorales, mejoras en los productos del SOS, desarrollo de mapas de vulnerabilidad climática para la cuenca del Río Culiacán, asistencia del personal del OCPN (Ing. Douriet) y del Servicio Meteorológico Nacional (Ing. Adelina Albanil) al Taller de Capacitación realizado en el INPE (Brasil) y organizado por VITO (Bélgica) en Brasil sobre métodos de uso de imágenes satelitales para la aplicación a nivel local, regional y nacional y participación en Congresos nacionales e internacionales con la presentación de los resultados del proyecto, (Ravelo, 2010).
- 5) Sistema Operativo para el Monitoreo, Evaluación y Pronóstico de Sequías en la Cuenca del Río Culiacán. Asistencia Técnica Especializada para el Desarrollo de Planes de Atención de Sequías, parte II. Manual operativo del sistema de pronóstico de sequías usando información sincrónica satelital y meteorológica incluyendo el desarrollo de la base de datos satelitales SPOT Vegetation y la utilización sincrónica de índices meteorológicos de sequía e información satelital; metodologías para entrenar neuronas en otras estaciones de la Región Hidrológica 10 (RH10) del OCPN-CONAGUA; generación de mapas de pronóstico de sequías; ampliación de cobertura del boletín; capacitación de técnicos de otros Organismos de Cuenca, del Servicio Meteorológico Nacional, de CONAGUA Central y de la UAS; capacitación de un técnico del OCPN en el CREAN en el desarrollo teórico-práctico de los conceptos de redes neuronales con ejemplos de aplicación en Meteorología, Hidrología y Sensores Remotos entre otros tópicos de interés como el análisis digital de imágenes y la utilización de programas computacionales para la creación de bases de datos *ad hoc*, diseño de redes y entrenamiento de dichas



redes; preparación y envío de un artículo científico para su publicación en la revista de la Asociación Geohidrológica Mexicana; colaboración con el programa doctoral de un técnico del OCPN y la utilización de información satelital facilitada merced a la capacitación en ITC (Holanda) del Ing. Douriet sobre métodos de uso de imágenes satelitales, materializada merced al auspicio otorgado por el Consultor ante los organizadores del evento, (Ravelo, 2011).

- 6) Monitoreo, Pronóstico y Evaluación de Riesgo por Sequía Hidrológica en la RH10 del OCPN; Utilización de información satelital en el monitoreo de las sequías. Análisis de las sequías en el OCPN en el período 1980-2012; incorporación de información satelital de última generación en el proceso de monitoreo y evaluación de las sequías a nivel regional con resultados del índice satelital de sequías, cálculo del índice de sequía hidrológica (SDI) y la utilización sincrónica de índices meteorológicos de sequía e información satelital; creación y aplicación del Sistema de Evaluación del Riesgo Extremo de Sequía (SERES) en el estado de Sinaloa con la construcción del IMM y el desarrollo del mapa de riesgo de sequías para dicha zona. Se amplió el SOS abarcando toda la RH10. Se mejoró la información que se incorpora al boletín de sequías del OCPN. Participación en congresos nacionales e internacionales con la presentación de los resultados del proyecto, los beneficios esperados en alerta de sequías y los lineamientos de un plan integral para la mitigación y adaptación a la sequía. Se colaboró en la preparación de dos propuestas doctorales, (Ravelo, 2012).

## **PRONACOSE Y LOS PMPMS EN EL OCPN**

La sequía de 2010 a 2012 motivó la búsqueda de una mejor gestión de este fenómeno, mediante la articulación de esfuerzos nacionales. Por tanto, se publicaron el “Decreto por el que se ordena a la Comisión Nacional del Agua establecer las medidas de prevención y control de los efectos provocados por fenómenos meteorológicos extraordinarios y se instruye a las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal a coordinarse y brindar todos los apoyos necesarios a dicha Comisión” (Semarnat, 2010); el “Acuerdo por el que se instruyen acciones para mitigar los efectos de la sequía que atraviesan

diversas entidades federativas” (Semarnat, 2012a), y los “Lineamientos que establecen los criterios y mecanismos para emitir acuerdos de carácter general en situaciones de emergencia por la ocurrencia de sequía, así como las medidas preventivas y de mitigación, que podrán implementar los usuarios de las aguas nacionales para lograr un uso eficiente del agua durante la sequía” (Semarnat, 2012b). Así, el 10 de enero de 2013 se puso en operación el Programa Nacional contra la Sequía (Pronacose), a fin de atender de manera integral este fenómeno. La atención integral implica la identificación e implementación de acciones para la toma de decisiones oportunas para la prevención y mitigación, acordando con las autoridades locales los programas y acciones necesarias para atender condiciones particulares en cada cuenca y usuario de agua nacional (Arreguín *et al.*, 2016).

El 25 de enero de 2012 se publicó en el *Diario Oficial de la Federación* (DOF) el acuerdo por el que se instruyeron acciones para mitigar los efectos de las sequías en las entidades federativas más afectadas por dicho fenómeno. En el acuerdo se establece la coordinación de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT); Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT); Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA); Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL); Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP); Comisión Nacional del Agua (CONAGUA); Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA), y Financiera Rural, para que desarrollaran conjuntamente acciones de mitigación ante la sequía presentada en 2011. El presupuesto federal asignado para las acciones fue de alrededor de 37 mil millones de pesos.

El OCPN ha elaborado Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación de Sequías (PMPMS) para atender los efectos del fenómeno en todos los Consejos de Cuenca (CONAGUA, 2014; Torrecillas *et al.*, 2013) con el objetivo general de Instrumentar acciones emergentes para prevenir y mitigar los efectos causados por el desabasto de agua en los diferentes usuarios del agua, causados por la sequía. Estos PMPMS fueron desarrollados bajo la óptica de la Gestión Integrada del Agua, sus objetivos particulares fueron: Asegurar una dotación de agua de entre 100 y 200 litros por habitante por día para el uso doméstico; Garantizar la cantidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades de los usuarios, de acuerdo con la prioridad de usos establecida en Ley de Aguas

Nacionales y con el principio de equidad entre entidades de un mismo uso; Desarrollar e implementar las medidas de prevención y mitigación estructurales y no estructurales frente a situaciones de sequía; Establecer un sistema de umbrales, mecanismos de monitoreo y difusión continua, con el fin de justificar las decisiones tomadas con respecto a la sequía; Fortalecer al Consejo de Cuenca con herramientas de gestión que permitan la coordinación eficiente del Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía; Asegurar la transparencia y la participación pública en la elaboración e implementación del PMPMS e Impulsar la Cultura del Agua, concientizar a la población en el uso eficiente y sustentable del agua, con el fin de reducir la demanda y aumentar la reutilización del recurso hídrico en los diferentes usos. Entre sus aspectos relevantes se encuentra el análisis histórico de la sequía y sus impactos en los territorios de los Consejos de Cuenca; la caracterización de las sequías a escala regional por cuencas; la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de la sequía mediante el SERES por cuencas y municipios y la propuesta de programa de educación, investigación científica y desarrollo tecnológico en materia de agua.

Durante los años 2014 y 2015 estos PMPMS fueron actualizados y se elaboraron los PMPMS de la Ciudades de Culiacán, Sinaloa y Victoria de Durango, Durango en 2014 y el de la ciudad de Mazatlán, Sinaloa en 2015 (Miguel *et al.*, 2015; <http://www.pronacose.gob.mx>).

Para el caso de los PMPMS de las Ciudades (Miguel *et al.*, 2015), sus objetivos principales fueron establecer en cada una de estas ciudades medidas de prevención y de mitigación de la sequía antes, durante y después de la ocurrencia del fenómeno, de modo que los usuarios del agua incrementen la disponibilidad del recurso hídrico y como objetivos particulares: Aumentar el abasto de agua de acuerdo con la reducción de la demanda, disminuyendo las fugas por distribución y uso, rehabilitando y ampliando las fuentes de abastecimiento actual y realizando campañas sobre el ahorro de agua; Planear acciones futuras para desarrollar infraestructura que garantice el abasto de agua a las ciudades; Tandear el suministro de agua de acuerdo a las zonas más críticas de disponibilidad o de mayor demanda atendiendo criterios de optimización; Proponer acciones para desarrollar conciencia sobre el cuidado del agua y Monitorear las variables

climatológicas para pronosticar el fenómeno de la sequía y proponer medidas de mitigación de acuerdo a los niveles intensidad.

No obstante lo anterior, para tener mejores resultados es necesario avanzar en el mejoramiento de dichos programas incluyendo el pronóstico de sequías meteorológicas e hidrológicas. Con este objetivo, en el OCPN se han usado redes neuronales para el pronóstico de la sequía considerando los indicadores PDSI y SPI, verificando una aceptable precisión de los pronósticos de sequías meteorológicas y en el caso de las sequías hidrológicas se ha comenzado el pronóstico multivariado con resultados promisorios en varias zonas de la región que es uno de los objetivos particulares del presente trabajo de investigación.

## **VULNERABILIDAD Y RIESGO DE SEQUÍAS**

La sequía es un fenómeno que se desarrolla lentamente, solamente afectando indirectamente a la vida humana. Sin embargo, los últimos años han demostrado lo vulnerable que pueden ser incluso las regiones industrializadas y financieras bien posicionadas, como Europa, donde períodos prolongados de sequía severa han causado grandes problemas ambientales, sociales y económicos (EEA, 1999; Bradford, 2000). Alrededor del 50% de las regiones intensamente pobladas del mundo que contienen la mayoría de las tierras agrícolas son muy vulnerables a la sequía (USDA, 1994).

La previsión de la sequía es un componente crítico de la sequía hidrológica que juega un papel importante en la gestión de riesgos, preparación para la sequía y mitigación. (Mishra and Singh, 2011).

En el OCPN en los últimos años se han hecho esfuerzos para la estimación de la vulnerabilidad y riesgo a la sequía por cuenca, municipios y Consejos de Cuenca; sus inicios fueron en el año 2012 con la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de la sequía para los municipios del estado de Sinaloa mediante el SERES (Ravelo, 2012);

posteriormente, en los PMPMS por Consejo de Cuenca se estimó la vulnerabilidad y riesgo a la sequía por cuenca, consejos de cuenca y municipios mediante el SERES (Torrecillas *et al.*, 2013). En las actualizaciones de los PMPMS por Consejos de Cuenca para la estimación de su vulnerabilidad a la sequía se utilizaron diferentes metodologías, el Superdecision en 2014 y metodología propuesta por CONAGUA-IMTA en 2015, (<http://www.pronacose.gob.mx>.), ambas metodologías muestran carencias en la estimación de la vulnerabilidad por municipios que la alejan de la realidad, por lo que debe desarrollarse una metodología de estimación de vulnerabilidad más apropiada que represente más objetivamente la realidad de dichas regiones.

## **ESTADO DEL ARTE DE REDES NEURONALES**

Ha sido considerable el trabajo realizado en el modelado de los diversos aspectos de la sequía, como la identificación y predicción de su duración y gravedad. Sin embargo, un importante reto de investigación es desarrollar técnicas adecuadas para la previsión de los puntos de comienzo y terminación de las sequías. Una de las deficiencias en la mitigación de los efectos de una sequía es la incapacidad de predecir con precisión las condiciones de sequía durante meses o años de antelación (Mishra and Singh, 2011).

Debido a la importancia de las RNA en el desarrollo de este trabajo, se hace una breve descripción en cuanto a definición, conceptos fundamentales, funcionamiento, arquitectura, procesos de aprendizaje (entrenamiento y validación), factibilidad de aplicación y ejemplos (casos) de aplicación, la cual se muestra en el Apéndice 1 “Redes Neuronales: Estado del Arte, su Aplicación y Validación en el Pronóstico de Sequías en el Organismo de Cuenca Pacífico Norte”. En esta sección se describen algunos puntos de interés.

## **QUE SON LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA)**

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) son modelos matemáticos inspirados en sistemas biológicos, adaptados y simulados en computadoras convencionales (Bocco y Ovando, 2013). Una Red Neuronal es un modelo matemático-computacional con un

conjunto de propiedades específicas, como son la habilidad de adaptarse o aprender, generalizar u organizar la información, todo ello basado en un procesamiento eminentemente paralelo, (Kröse *et al.*, 1993). Las redes neuronales son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso de los animales. Se trata de un sistema de interconexión de neuronas en una red que colabora en producir un estímulo de salida. La capacidad de aprendizaje adaptativo es una de las características más atractivas de redes neuronales. Esto es, aprenden a llevar a cabo ciertas tareas mediante un entrenamiento con ejemplos ilustrativos. Como las redes neuronales pueden aprender a diferenciar patrones mediante ejemplos y entrenamientos, no es necesario elaborar modelos a priori ni necesidad de especificar funciones de distribución de probabilidad (Ravelo, 2008).

En el proceso de aprendizaje, los enlaces ponderados de las neuronas se ajustan de manera que se obtengan ciertos resultados específicos. Una red neuronal no necesita un algoritmo para resolver un problema, ya que ella puede generar su propia distribución de pesos en los enlaces mediante el aprendizaje. Este proceso es realizado con series temporales de los índices de sequía de forma de lograr un sistema calibrado y validado para el pronóstico de la ocurrencia de sequías. La aplicación de redes neuronales a la predicción de la ocurrencia de sequías ha sido documentada en la bibliografía científica (Morid *et al.*, 2007; Hyun and Salas, 2000).

## **UTILIDAD DE LAS RNA**

Las redes de neuronas permiten abordar problemas de predicción y clasificación, (Bocco y Ovando, 2013). Su aplicación es muy variada y cada vez más abundante, entre estos temas de ejemplo, están: Predicción de series de tiempo: variables climáticas, económicas, marketing, hidrología; procesado de Imágenes en el ámbito de la Medicina, Industria y Defensa; clasificación de Datos provenientes de sensores; compresión y Codificación de Información, entre otras.

Una breve historia, modelo básico y abstracto de funcionamiento, estructuras, etapas para llevar a cabo una aplicación (tipos, definición de arquitectura, fase de aprendizaje o entrenamiento y validación), alcances, límites y beneficios se describen en el Apéndice 1.

## **APLICACIONES DE LAS RNA EN EL PRONÓSTICO DE SEQUÍAS EN EL OCPN**

Con la capacidad de procesar la información masiva y tratar con una alta no linealidad, las RNA han sido ampliamente estudiadas y aplicadas con éxito en varios campos, por ejemplo, la hidrología y los recursos hídricos, en los últimos años (Hsu *et al*, 1995; Sajikumar and Thandaveswara, 1999; Chang *et al*, 2005 y 2007; Karunasinghe and Liong, 2006; Sahoo and Ray, 2006; Chiang *et al*, 2007; Kim and Kim, 2008; Ravelo *et al.*, 2014).

En nuestro caso de aplicación las variables de entrada al modelo son datos medidos o registrados, en este caso en estaciones climatológicas e hidrométricas, de variables como la precipitación o escurrimientos; o valores previamente estimados, como los índices meteorológicos (SPI, PDSI, NDVI), de escurrimiento (SDI) o índice de Estado (Ie). Los tipos y arquitecturas de RNA aplicadas fueron: Perceptron, Perceptron Multicapa (Multilayer Perceptron), Redes Recurrentes (Red de Hopfield, Red Multicapa), Multicapa Feedforward, Modular Neural Network, y Principal Component Analysis, entre otras; considerando diferentes funciones de transferencia (TanhAxon, SigmoidAxon, Linear TanhAxon) y Learning Rule (Step, Momentum, Conjugate Gradiente), considerando diferentes porcentajes de datos para su validación y entrenamiento; aplicando para ello el programa de Redes Neuronales NeuroSolutions ([www.neurosolutions.com](http://www.neurosolutions.com)).

Los resultados obtenidos de aplicar redes neuronales a índices de sequía pueden presentarse en gráficos de coordenadas para series de cada localidad y en mapas para la presentación de resultados regionales sobre los pronósticos a distintos plazos. Debe destacarse que a medida que aumenta el plazo del pronóstico también aumenta el error

cuadrático medio del pronóstico. Así un pronóstico a seis meses es menos preciso que uno a tres meses y, este es, a su vez, menos preciso que uno a un mes (Ravelo, 2008).

## **VALIDACIÓN DE LAS APLICACIONES DE LAS RNA EN EL PRONÓSTICO DE SEQUÍAS EN EL OCPN**

La fase de validación consiste en aplicar la red entrenada a otro conjunto de datos independientes para los cuales se conocen los resultados a fin de comprobar la eficiencia de la misma.

La mayor parte de las redes neuronales artificiales (RNA) presentes, no obstante, dependen en gran medida de los expertos humanos que tienen un conocimiento suficiente sobre los diferentes aspectos de la red y el dominio del problema (Abraham, 2004). Estos generalmente asumen una arquitectura específica y no descubren automáticamente los módulos de red apropiados para los datos específicos de formación. Estas redes aprenden de los datos de entrenamiento mediante el ajuste de los pesos de las conexiones (Haykin, 1994). La selección de la arquitectura de red tiene una influencia significativa en el rendimiento de las RNAs. El principal reto de la aplicación de RNA es cómo evolucionar la arquitectura de red neuronal única y sus correspondientes valores de peso para un problema específico, (Sattari *et al.*, 2012).

Las RNA han sido usadas extensamente en la predicción de flujos de corrientes (House y Chang, 2011), y recientemente en la predicción de los cambios en los niveles de agua de acuíferos (Sun, 2013). Cuando se usa la aplicación de las redes neuronales para modelar lluvia-escorrentía se deben tomar una serie de decisiones. En primer lugar, hay que elegir un tipo de red neuronal adecuada. En segundo lugar, hay que elegir un algoritmo de entrenamiento apropiado, seleccionar períodos de formación adecuados y determinar una estructura de red apropiada. En tercer lugar, se debe decidir el ante y post proceso de datos entrada y salida. Un paso importante en el proceso de desarrollo del modelo RNA es la división de datos, que divide los datos disponibles en el entrenamiento, prueba y



validación de datos (Maier *et al.*, 2010). El conjunto de entrenamiento se utiliza para optimizar los parámetros del modelo (entrenar el modelo); el equipo de prueba se utiliza para la validación cruzada durante el entrenamiento para evitar el exceso de montaje; y el conjunto de validación se utiliza para evaluar el rendimiento del modelo entrenado. Por lo tanto, la capacidad de generalización del modelo de formación se prueba de forma rigurosa (May *et al.*, 2010).

## **ESCENARIOS CLIMÁTICOS Y PRONÓSTICOS DE SEQUÍAS**

Las condiciones extremas en el clima siempre han afectado a la humanidad, principalmente a quienes trabajan en el campo. Períodos de secas han resultado en cosechas pobres y, en muchas ocasiones, en hambruna y migraciones masivas; también la ganadería, la pesca, la generación de energía eléctrica, las comunicaciones y el suministro de agua subterránea, se ven afectadas por las variaciones del sistema climático (IPCC *et al.*, 2008). Incluso la salud humana puede reflejar los efectos negativos de condiciones meteorológicas extremas. Por ello, resulta fundamental tener un mejor entendimiento de los mecanismos que controlan el clima, para así planear y tomar decisiones en materia de producción agrícola, ganadera y pesquera, o en materia de protección civil. (Magaña *et al.*, 2008).

El análisis de futuros escenarios de sequía es un aspecto de gran relevancia en el planteamiento y manejo de sistemas de recursos hídricos, particularmente cuando volúmenes de agua deben ser asignados (Bruins, 2003). La predicción de futuras sequías debe llevarse a cabo teniendo en cuenta la variabilidad temporal y espacial de los recursos hídricos y su incertidumbre inherente (Basson and Van Rooyen, 2001).

En México, las variaciones que el clima manifiesta año con año están en gran medida determinadas por la ocurrencia del fenómeno *El Niño/La Niña* (Magaña y Quintanar, 1997). La sequía, fenómeno recurrente en este país, se manifiesta con mayor incidencia en la porción norte del país (Magaña, 2004), debido a que es más vulnerable a su ocurrencia (Velasco, 2002). En la zona del Pacífico Norte, que incluye al estado de Sinaloa, la

estadística de lluvias define claramente los períodos de baja precipitación, que pueden extenderse por cinco, seis y hasta siete años consecutivos, como las ocurridas durante los períodos 1997-2004 y 2010-2012 (Sanz *et al.*, 2012; Arreguín *et al.*, 2016).

En el OCPN en los últimos años se ha tenido la presencia de eventos extremos más frecuentes e intensos como las sequías anteriormente mencionadas, el huracán Manuel en el 2013 y en los últimos tres años un período de abundante humedad, sobresaliendo el año 2015.

Por otra parte es importante diferenciar entre pronóstico, perspectiva y escenario. El pronóstico se obtiene a menudo utilizando modelos deterministas, las salidas de éstos pueden permitir un cierto nivel de confianza que debe atribuirse. La perspectiva es el resultado de la integración y discusión de especialistas del área de Climatología y Meteorología (por ejemplo del SMN), mediante el uso de métodos de pronósticos estadísticos (“Años Análogos” y sistema “Climate Predictability Tool -CPT-”) y pronósticos dinámicos (Modelos numéricos del clima de diversos Centros Internacionales y ensambles multimodelo) y Escenario es una descripción coherente, internamente consistente y plausible de un posible estado futuro del mundo. No es un pronóstico; más bien, cada escenario es una imagen alternativa de como el futuro puede desplegarse. Un pronóstico puede servir como materia prima para un escenario, pero los escenarios a menudo requieren información adicional. A menudo un conjunto de escenarios es a menudo adoptado para reflejar, tan bien como sea posible, el rango de incertidumbre en los pronósticos. Los escenarios climáticos son el resultado de varios procesos de recolección, creación, perfeccionamiento y elaboración de datos (SMN, 2016).

## **PREVENCIÓN, MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN A LA SEQUÍA EN UN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO**

La previsión de la sequía es un elemento crítico en la gestión del riesgo de sequía. La importancia de la previsión de la sequía está siendo reforzada por la escasez de agua que ocurre con mucha frecuencia en todo el mundo en los últimos años (Mo *et al.*, 2009).

El éxito de la preparación y mitigación de la sequía depende, en gran medida, de la información oportuna en el inicio de las sequías e intimo desarrollo y el espacio. Esta información puede ser obtenida a través del monitoreo continuo de la sequía, que normalmente se realiza utilizando los índices de sequía. Muchos de los modelos de predicción de sequía se han desarrollado en los últimos años (Mishra and Singh 2010 y 2011).

## **HIPÓTESIS**

El análisis multivariado temporal mediante la aplicación de las redes neuronales contribuye a la determinación de escenarios por sequías, aportando elementos para estimar su vulnerabilidad y riesgo futuros ante el fenómeno.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar escenarios de sequías y su variabilidad temporal y espacial en el Organismo de Cuenca Pacífico Norte utilizando redes neuronales artificiales.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Monitorear temporal y espacialmente las sequías meteorológicas, mediante los índices puntuales (SPI y PDSI) y satelital (NDVI).
2. Analizar temporalmente las sequías hidrológicas, utilizando los índices SDI y de Estado (Ie), en las principales corrientes y presas existentes.
3. Determinar escenarios de sequías meteorológicas a 1, 2 y 3 meses mediante el pronóstico de índices de sequía usando redes neuronales.
4. Pronosticar los índices de sequía hidrológica, mediante las redes neuronales, para las principales corrientes y presas existentes.

5. Estimar la vulnerabilidad por sequía para diferentes escenarios, en las cuencas, Consejos de Cuenca y municipios.
6. Desarrollar una metodología para el análisis multivariado temporal y pronóstico de sequías hidrológicas, mediante el uso de redes neuronales, variables meteorológicas, volúmenes de escurrimiento e índices de sequía hidrológica (SDI).

## **IMPORTANCIA DEL ESTUDIO**

Este estudio permite realizar planes de atención de sequías basados en el monitoreo, evaluación, pronóstico, estimación de la vulnerabilidad y determinación de escenarios por sequías meteorológicas e hidrológicas temporales y espaciales en el OCPN, utilizando el SOS y diversas metodologías probadas, aplicando una metodología estadísticamente validada que integra un buen diagnóstico considerando a todos los factores que intervienen en la dinámica de la cuenca e impactan al ambiente y a la sociedad. Creando condiciones para la estimación y gestión del riesgo de la población ante la ocurrencia del fenómeno en sus diferentes fases de intensidad y duración, para que los tomadores de decisión apliquen e implanten las medidas preventivas y de mitigación.

Por lo tanto, el establecimiento de una metodología para la determinación de escenarios por sequías hidrológicas, basado en el análisis multivariado temporal usando redes neuronales, aplicado por localidad, estación hidrométrica y/o presa en los Sistemas Hídricos, contribuyendo a la gestión apropiada de los recursos hídricos como medida de prevención de riesgo y respuesta ante el desastre, y a la adaptación al cambio climático.

## **CAPÍTULO 2**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **MATERIALES**

#### **CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

##### **LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio está comprendida por las cuencas que corresponden al Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN); considerando que las sequías son de gran extensión (Velasco, 2002), la unidad de gestión es la cuenca (PHR, 2015) y es la escala en donde mejor se pueden evaluar los impactos ambientales, económicos y sociales por sequía (Ravelo, 2008; Douriet, 2010 y Torrecillas *et al.*, 2013).

Las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa, Mocorito, Culiacán, San Lorenzo, Elota, Piaxtla, Quélite, Presidio, Baluarte, Cañas, Acaponeta y San Pedro; así como las corrientes independientes que integran el OCPN, se encuentran ubicadas en el noroeste de México, entre las coordenadas 28°10'30" y 21°41'49" de Latitud Norte y 103°27'50" y 109°25'55" de Longitud Oeste, y comprende la totalidad del estado de Sinaloa y parte de los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas y Nayarit; colinda al norte con el estado de Sonora, perteneciente al Organismo de Cuenca Noroeste; al noreste con el estado de Chihuahua, integrado al Organismo de Cuenca Río Bravo; al este con el estado de Durango, comprendido en el Organismo de Cuencas Centrales del Norte, y también al este y al sur con los estados de Zacatecas y Nayarit, incorporados al Organismo de Cuenca Lerma Santiago Pacífico, Figura 2.1, adaptada de CONAGUA, (2015b).

## DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca está integrada por 51 municipios: 18 de Sinaloa, 8 de chihuahua, 16 de Durango, 7 de Nayarit y 2 de Zacatecas, abarcando una extensión total de 152.007 km<sup>2</sup> (CONAGUA, 2015b), que corresponden al 8 % del territorio nacional. Dentro de su jurisdicción existen los Consejos de Cuenca de los Ríos: Fuerte y Sinaloa, Mocorito al Quélite y Presidio al San Pedro; los dos primeros consejos de cuenca integran la Región Hidrológica No. 10 y el último conforma la Región Hidrológica No. 11. En la Figura 2.2, se muestran los municipios existentes dentro de la jurisdicción del OCPN, por estado.

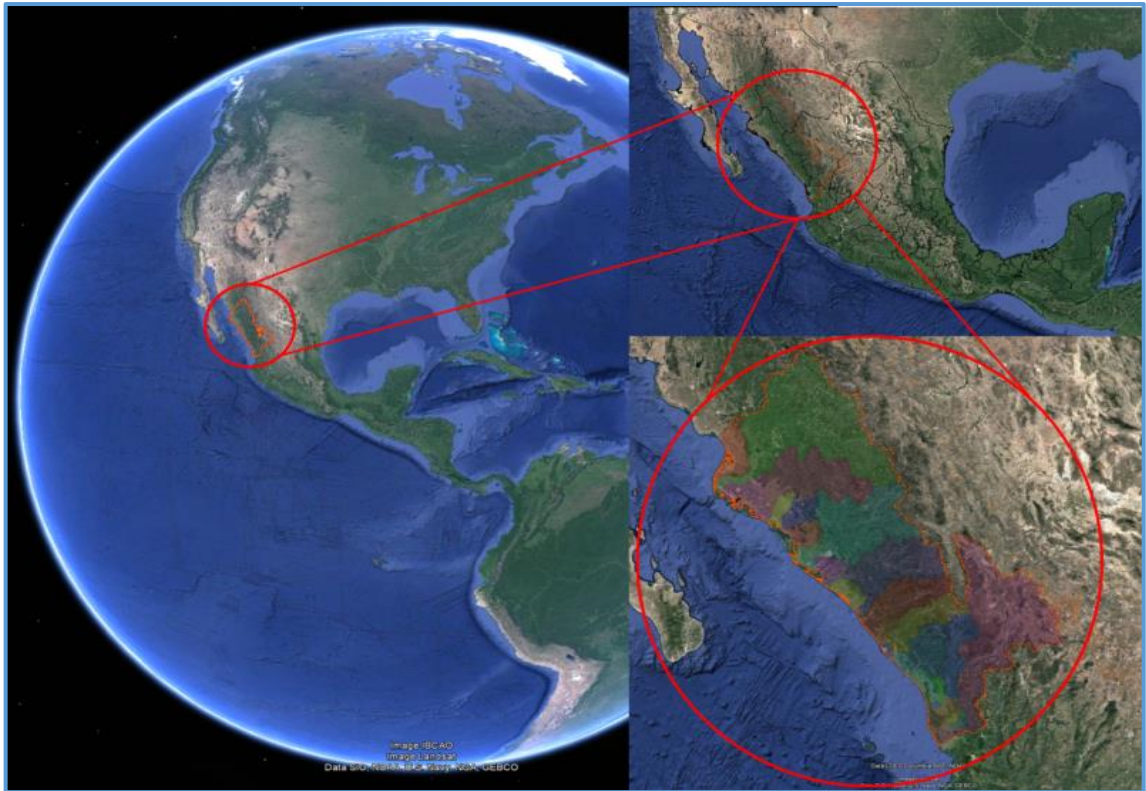
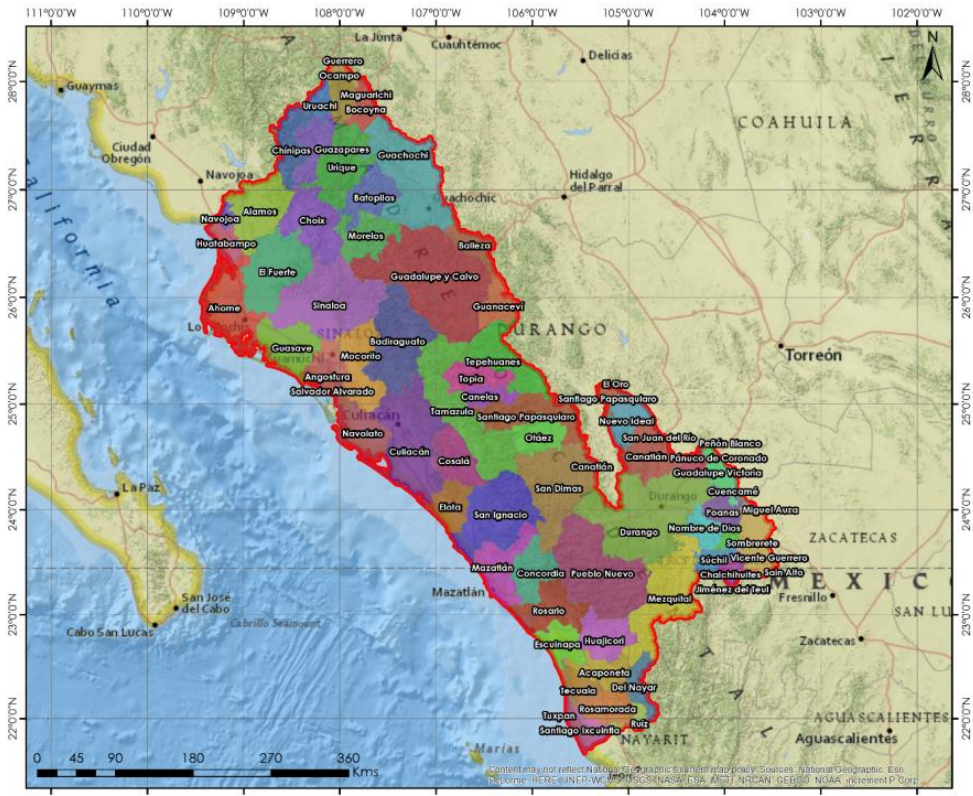


Figura 2.1. Localización del Organismo de Cuenca Pacífico Norte.

### MUNICIPIOS PRESENTES EN EL ORGANISMO DE CUENCA PACÍFICO NORTE



MUNICIPIOS POR ESTADO																													
<b>CHIHUAHUA</b>				<b>DURANGO</b>				<b>SINALOA</b>				<b>SONORA</b>																	
08. Balleza	08. Batopilas	08. Bocoyna	08. Chihuahua	08. Guachochi	08. Guadalupe y Calvo	08. Guazapares	08. Guerrero	08. Maguanshi	08. Morelos	10. Ocampo	10. Uruachi	10. Guanaceví	10. Mezquital	10. Nombre de Dios	10. Nuevo Ideal	10. Oláez	10. Peñón Blanco	10. Coneto de Comonfort	10. Cuencamé	10. Durango	10. El Oro	10. San Dimas	10. San Juan del Río	10. Cuicuilán	10. El Fuerte	10. Huatabampo	10. Navojoa		
18. Rosamorada	18. Huajicori	18. Del Nayar	18. Acaponeta	18. Tepic	18. Tuxpan	18. Toluca	18. Santiago Ixcuintla	18. Rosamorada	18. Huajicori	18. Rosamorada	18. Huajicori	18. Rosamorada	18. Huajicori	18. Rosamorada	18. Huajicori	18. Rosamorada	18. Huajicori	18. Rosamorada	18. Huajicori	18. Rosamorada	18. Huajicori	18. Rosamorada	18. Huajicori	18. Rosamorada	18. Huajicori	18. Rosamorada	18. Huajicori	18. Rosamorada	18. Huajicori
25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	25. Sinaloa	

Figura 2.2. Municipios del Organismo de Cuenca Pacifico Norte.

## AGUAS SUPERFICIALES

El sistema de aguas superficiales de la Región Hidrológica Administrativa III Pacífico Norte (RHAIIPN) está conformado por las cuencas de 13 ríos principales que descargan al Océano Pacífico y grupos de corrientes de corrientes que descargan a esteros o al mar. El OCPN está integrado por las cuencas de los Ríos Fuerte, Sinaloa, Mocerito, Culiacán, San Lorenzo, Elota, Piaxtla, Quélite, Presidio, Baluarte, Cañas, Acaponeta y San Pedro, (Figura 2.3).



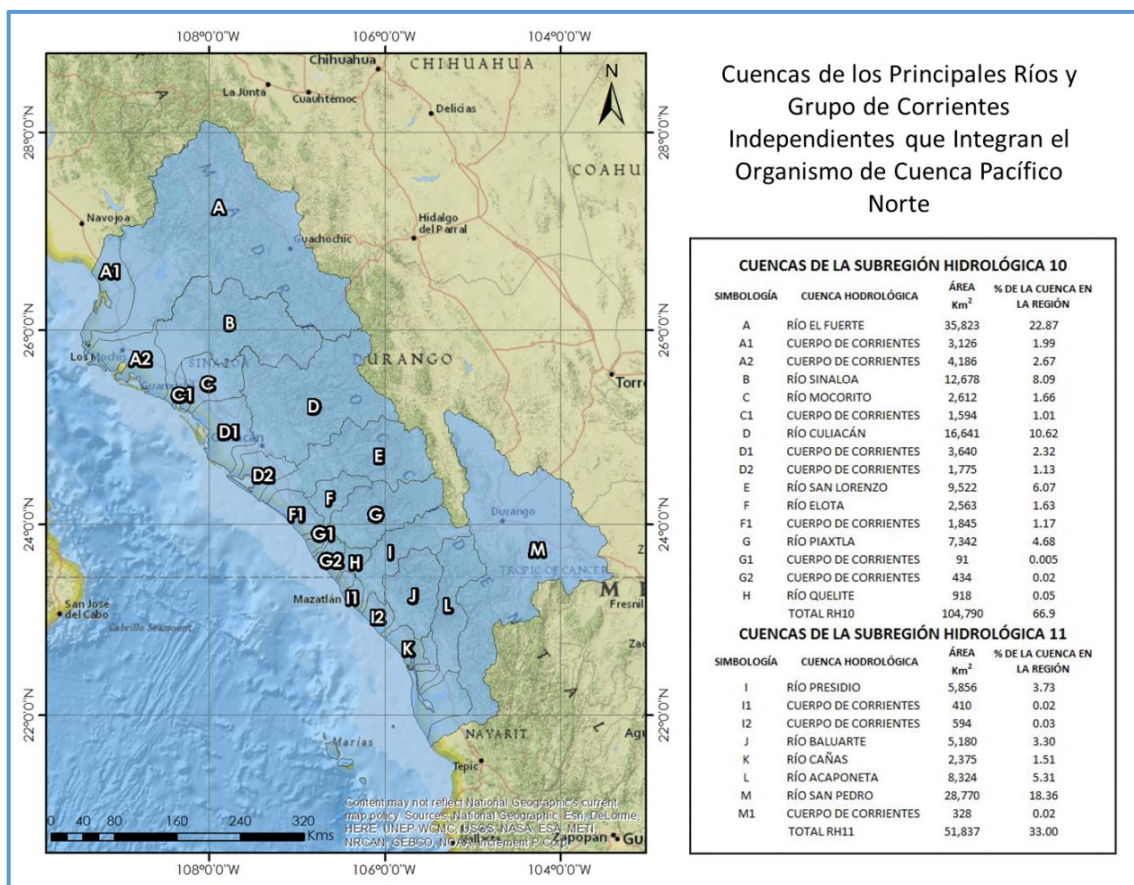


Figura 2.3. Mapa de cuencas de los principales ríos y grupo de corrientes independientes que integran el OCPN.

En la RHAIIPN existen 16 embalses principales con una capacidad total de 22,924.6 hm<sup>3</sup> y volumen útil de 15.639,3 hm<sup>3</sup>, de los cuales 11 embalses se encuentran en las cuencas del norte y del centro de la región y cinco en la parte alta de la cuenca del Río San Pedro.

Las presas de mayor capacidad útil son: Luis Donaldo Colosio (Huites) y Miguel Hidalgo y Costilla (El Mahone), construidas sobre el Río Fuerte, con un volumen de 2.908 hm<sup>3</sup> y 2.921,4 hm<sup>3</sup>, respectivamente; Adolfo López Mateos (El Varejonal), en la cuenca del Río Culiacán con 3.086,6 hm<sup>3</sup>; la Gustavo Díaz Ordaz (Bacurato), sobre el río Sinaloa, con un volumen de 1.737,3 hm<sup>3</sup> y la José López Portillo (Comedero), en la cuenca del Río San Lorenzo con 2.580 hm<sup>3</sup>; Tabla 2.1 y Figura 2.3 (OCPN, 2016).

En la RHAIIPN existen diez distritos de riego con un área estimada en 800.000 hectáreas. De éstos ocho se localizan en el estado de Sinaloa, uno en el estado de Nayarit y uno en Durango; el resto de las superficies de riego las constituyen las Unidades de Riego (URDERALES). Los distritos de riego con mayor superficie son el 075 Río Fuerte, que registra 228.440 ha, y el 010 Culiacán-Humaya, 212.141 ha. (CONAGUA, 2012).

Tabla 2.1. Principales presas en el Organismo de Cuenca Pacífico Norte

PRESA		Capacidad Total (hm <sup>3</sup> )	Volumen Útil Total (hm <sup>3</sup> )	Coordenadas Geográficas								Elevación (msnm)
Nombre Oficial	Nombre común			Latitud				Longitud				
Luis Donaldo Colosio	Huites	4568	2908	N	26°	50'	47,1"	W	108°	21'	59,2"	235
Adolfo López Mateos	El Varejonal	4034,5	3086,6	N	25°	6'	4,6"	W	107°	23'	14,8"	165
José López Portillo	El Comedero	3966,2	2580,2	N	24°	34'	18,9"	W	106°	48'	27,3"	260
Miguel Hidalgo y Costilla	El Mahone	3917,1	2921,4	N	26°	30'	33,2"	W	108°	34'	44,9"	130
Gustavo Díaz Ordaz	Bacurato	2687,1	1737,3	N	25°	51'	23,5"	W	107°	54'	41,8"	235
Sanalona	Sanalona	970,6	673,5	N	24°	48'	53,4"	W	107°	9'	6,2"	135
Aurelio Benassini V.	El Salto	815,5	403,9	N	24°	7'	20,8"	W	106°	41'	52,6"	165
Josefa O. de Domínguez	El Sabino	685,1	518,9	N	26°	25'	36,5"	W	108°	42'	6,9"	100
Guillermo Blake Aguilar	El Sabinal	468,6	294	N	26°	6'	12,1"	W	108°	19'	37,7"	190
Eustaquio Buelna	Guamúchil	265	90,1	N	25°	29'	2,9"	W	108°	3'	55,5"	60
Picachos	Picachos	580	247	N	23°	28'	50,5"	W	106°	12'	19,0"	120
Santiago Bayacora	Santiago Bayacora	133,5	130	N	23°	52'	32,0"	W	104°	40'	35,3"	1955
Francisco Villa	Francisco Villa	101	78,7	N	24°	0'	8,4"	W	103°	57'	33,8"	1955
Guadalupe Victoria	Guadalupe Victoria	94,6	84,9	N	23°	57'	42,5"	W	104°	45'	11,1"	1935
Caboraca	Caboraca	60	45	N	24°	32'	16,2"	W	104°	48'	38,4"	1995
Peña del Águila	Peña del Águila	55,8	31,7	N	24°	12'	12,8"	W	104°	39'	25,6"	1890

Fuente: Dirección Técnica, OCPN, CONAGUA (2016).

## AGUAS SUBTERRÁNEAS

El aprovechamiento del agua superficial mediante las obras de almacenamiento no ha sido suficiente para satisfacer las demandas por lo que se ha recurrido a la explotación del agua subterránea en los acuíferos de la RHAIIPN. Como se observa en la Tabla 2.2, de los 24 acuíferos, siete presentan un déficit anual total de 35,4 hm<sup>3</sup>.

Tabla 2.2. Balance hidráulico de los acuíferos en el Organismo de cuenca Pacífico Norte.

ACUÍFERO		RECARGA (hm <sup>3</sup> )	EXTRACCIÓN (hm <sup>3</sup> )	VOLUMEN CONCESIONADO (hm <sup>3</sup> )	DISPONIBILIDAD AGUA SUBTERRANEA (hm <sup>3</sup> )	CONDICIÓN DE DISPONIBILIDAD
CLAVE	NOMBRE					
2503	Río Mocorito	137,9	89,8	109,550709	-15,950709	Déficit
2504	Río Culiacán	416,9	168,9	222,826077	20,673923	Disponibilidad
2505	Río San Lorenzo	335,0	125,6	97,134992	49,905008	Disponibilidad
2506	Río Elota	45,3	6,7	10,238428	33,861572	Disponibilidad
2507	Río Piaxtla	51,3	19,1	22,028705	27,271295	Disponibilidad
2508	Río Quéelite	17,9	8	6,058344	11,141656	Disponibilidad
2509	Río Presidio	163,3	76,6	79,89914	17,60086	Disponibilidad
2510	Río Baluarte	79,6	13,8	24,780926	34,119074	Disponibilidad
2511	Valle de Escuinapa	42,7	1,8	0,592488	12,107512	Disponibilidad
2512	Laguna Agua Grande	146,7	11,9	16,402358	28,697642	Disponibilidad
2513	Río Cañas	90,5	0,7	15,133834	-0,133834	Déficit
1801	Valle Acaponeta-Cañas	30,0	10,6	17,77585	2,22415	Disponibilidad
1802	San Pedro-Tuxpan	167,6	4,9	19,913034	16,186966	Disponibilidad
1001	Valle de Santiaguillo	50,7	60	43,993118	-1,293118	Déficit
1002	Valle de Canatlán	47,1	48	41,369794	-0,769794	Déficit
1003	Valle de Guadiana	133,1	148,3	133,15066	-6,05066	Déficit
1004	Vicente Guerrero-Poanas	95,3	93,2	93,005999	-5,905999	Déficit
1005	Madero-Victoria	22,5	22,6	26,934655	-5,234655	Déficit
1017	Valle del Mezquital	1,1	1,1	0,220188	0,879812	Disponibilidad
3201	Sabinas	13,7	3	8,103295	3,096705	Disponibilidad
3202	Hidalgo	7,4	5,1	3,383015	4,016985	Disponibilidad
2501	Río Fuerte	372,3	215,3	159,001272	140,498728	Disponibilidad
5202	Río Sinaloa	448,6	252,4	202,063975	105,236025	Disponibilidad
2514	El Carrizo	160,0	0	0	24	Disponibilidad
Total =		3076,4	1387,44	1353,560857	496,1791431	

Fuente: OCPN (2016).

## EL CLIMA EN LA ZONA DE ESTUDIO

Según la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García (1981), y sobre la base de las condiciones particulares de la República Mexicana (www.ineter.gob.mx; INEGI, 1981), el clima que prevalece en el Organismo de Cuenca Pacífico Norte, es variado y se describe a continuación (Figura 2.4).

Los climas predominantes en la región hidrológica son templado subhúmedo y cálido subhúmedo. La temperatura media anual en la región presenta fuertes variaciones, y oscila entre los 10 y los 26°C. Se puede observar que en la porción norte de la región se presentan temperaturas más cálidas y secas, aunque en las partes serranas pueden presentarse temperaturas bajo cero en ciertas épocas del año.

A medida que se va más hacia el sur, la temperatura se hace más templada y húmeda, con temperaturas medias de 12 a 18°C, máximas de 22°C y bajo cero en las zonas serranas en ciertas épocas. En el caso de la región del Valle del Guadiana, la temperatura media es de entre 16 y 18°C, con mínimas bajo de cero en ciertas épocas y máximas mayores de 24°C.

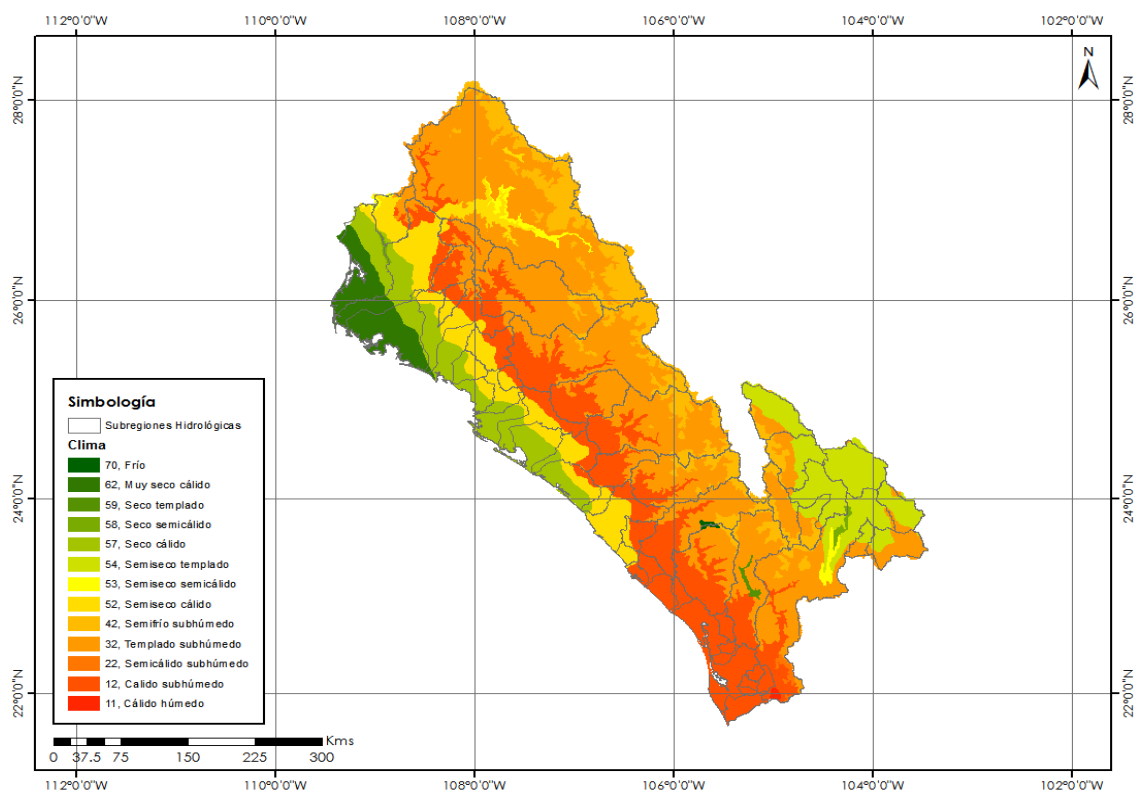


Figura 2.4. Climas predominantes en el área de estudio (CONAGUA, 2012).

En la RHAIIPN, para el período 1981-2010, se tuvo una precipitación media anual de 765 mm, valor muy parecido a la media nacional de 740 mm (CONAGUA, 2015b), donde

el 70% de la precipitación anual se presenta entre los meses de julio a septiembre (CONAGUA, 2012).

## INDICADORES NORMATIVOS DE LAS FASES DE LA SEQUÍA

Los valores normativos se refieren a la clasificación de los índices utilizados para la determinación de las fases de la sequía en el monitoreo y pronóstico del evento. Para esta investigación se utilizaron índices meteorológicos, hidrológicos y de vulnerabilidad.

### INDICADORES METEOROLÓGICOS

Los índices meteorológicos utilizados fueron: el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) a diferentes escalas de tiempo, el Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) y el Índice Normalizado de diferencia de la Vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés). Además, se requirió la generación de una base de datos meteorológicos, edafológicos y agrológicos correspondientes a la zona en estudio; el Sistema Operativo de Sequías (SOS) del Proyecto de Sequías del OCPN (Ravelo, 2008), el cual estima en forma automatizada los valores de los índices y grafica los planos de la variabilidad espacial de la sequía. Se utiliza el Sistema de Información Geográfica IDRISI para el manejo de las imágenes satelitales y para la determinación del índice NDVI (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Índices de sequía meteorológica y los programas utilizados en su estimación










ÍNDICE DE SEQUÍA	PROGRAMA	DESCRIPCIÓN
SPI	SPI.EXE-SOS	Índice estandarizado de precipitación (McKee <i>et al</i> ,1993)
PDSI	PDI.EXE-SOS	Índice de severidad de sequía de Palmer (Palmer, 1965)
NDVI	IDRISI-IDRISI	Índice normalizado de diferencia de vegetación (Ravelo, 2008)

## ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI)

El SPI es un indicador basado en la probabilidad de lluvias en cualquier período de tiempo. Fue desarrollado por McKee *et al.*, (1993 y 1995) para cuantificar el déficit de precipitaciones durante múltiples escalas de tiempo. Estos períodos reflejan el impacto de la sequía sobre la disponibilidad de los diferentes recursos hídricos. Las condiciones de humedad del suelo responden a las anomalías pluviométricas en un intervalo de tiempo relativamente corto, mientras que el agua subterránea, el caudal de los cursos superficiales y el agua embalsada reflejan tales anomalías a largo plazo, razón por la cual, el SPI se calcula para períodos de tiempo de 1, 3, 6, 12, 24 y 48 meses.

En la evaluación de las características físicas de la sequía, mediante los valores del SPI a diferentes escalas de tiempo y su representación espacial, se utilizó la clasificación propuesta por (Hayes, 2000), quién partió de la escala original de (McKee *et al.*, 1993); la cual se ilustra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Clasificación de rangos de valores del SPI y su paleta de colores definida en el SOS (Hayes, 2000; Ravelo, 2009).

Referencias SPI		
2,00 ó mayores		Humedad Extrema
1,99 a 1,50		Humedad Excesiva
1,49 a 1,00		Humedad Moderada
0,99 a 0,50		Humedad Incipiente
0,49 a -0,49		Normal
-0,50 a -0,99		Sequía Incipiente
-1,00 a -1,49		Sequía Moderada
-1,50 a -1,99		Sequía Severa
-2,00 ó menores		Sequía Extrema

La clasificación y paleta de colores que se muestra en la tabla 2.4 fue definida específicamente para la evaluación espacial de la sequía en el OCPN, mediante el índice SPI en el SOS (Ravelo, 2011).









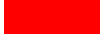
Las escalas más usuales y lógicas para el SPI son: una escala temporal de uno a tres meses para la sequía estacional o de corto plazo, asociada a las de tipo meteorológica y agrícola, considerando en este caso, los períodos estacionales correspondiente a la temporada de lluvias (julio, agosto y septiembre); y de estiaje (abril, mayo y junio), así como las lluvias acumuladas, correspondientes; la escala de 6 meses para evaluar las sequías intermedias y las escalas de 12 a 24 meses para las sequías de largo plazo, hidrológica y geohidrológica. Por tanto, para un mes y año específicos, el valor del SPI depende de la escala de tiempo con que se haya calculado.

### ÍNDICE DE SEVERIDAD DE SEQUÍA DE PALMER (PDSI)

El PDSI (Palmer, 1965; Allen *et al.*, 1998), se basa en el balance hídrico seriado, el cual utiliza datos de suelo, temperatura, precipitación y evapotranspiración, por lo que se le considera un índice de tipo agrícola, ya que esencialmente monitorea la disponibilidad de agua en el suelo, mes a mes, y su relación con las necesidades hídricas de las plantas (Ravelo, 2007; Douriet, 2010).

Los valores del PDSI oscilan entre -6,0 y +6,0, para períodos ordenados de secos a húmedos, como se ilustra en la Tabla 2.5. Al igual que el índice anterior, se le estableció su paleta de colores para evaluar espacialmente las sequías; se definieron colores similares al del SPI, con la finalidad de observar mejor las diferencias resultantes de comparar ambos métodos (Ravelo, 2009; Douriet, 2010).

Tabla 2.5. Clasificación de rangos de valores del PDSI y su paleta de colores definida en el SOS (Palmer, 1965; Ravelo, 2009).

Referencias PDSI		
4,00 ó mayores		Humedad Extrema
3,00 a 3,99		Humedad Excesiva
2,00 a 2,99		Humedad Moderada
1,00 a 1,99		Humedad Incipiente
-0,99 a 0,99		Normal
-1,00 a -1,99		Sequía Incipiente
-2,00 a -2,99		Sequía Moderada
-3,00 a -3,99		Sequía Severa
-4,00 ó menores		Sequía Extrema

## ÍNDICE NORMALIZADO DE DIFERENCIA DE LA VEGETACIÓN (NDVI)







El Índice Normalizado de Diferencia de la Vegetación (NDVI) es un índice obtenido de información satelital y que está relacionado con la cantidad de vegetación verde en la superficie terrestre. Por consiguiente, el NDVI está directamente relacionado con el porcentaje de la cobertura vegetal, con la biomasa verde o herbácea total (toneladas/ha) para cada tipo de vegetación, con el “índice del área foliar” (IAF) que se usa a menudo en los modelos de cultivos, y con la actividad fotosintética de la vegetación (Ravelo, 2008; Douriet, 2010).

El NDVI es utilizado para el monitoreo y evaluación de las sequías mediante el cálculo de imágenes de anomalía (Ravelo y Pascale, 1997). Sus ventajas son la amplia cobertura y la adecuada escala geográfica, su complementación con otros índices y su relación con la productividad de los cultivos. La información satelital utilizada, proviene de las imágenes del sensor MODIS, las cuales se pueden descargar del siguiente sitio web: <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb>, (Ravelo, 2012) lo cual permite disponer del NDVI a tiempo real para su operación mediante sistemas operativos convencionales.

La escala de evaluación teórica del NDVI puede ir de -1 a +1. Sin embargo, los valores actualmente medidos van de montos negativos que representa al agua (-1 a -.001), de cero correspondiente al suelo desnudo hasta el valor de +0,6 que equivale a la vegetación verde densa. Debido a la variación espectral de los suelos con poca cobertura vegetal, para realizar comparaciones sistemáticas de valores de NDVI para áreas los valores de NDVI deben ser mayores de cero y entre 0,05-0,6, (Ravelo, 2008). En la Tabla 2.6, se muestra una escala de valores y una paleta de clasificación de fases de sequías asociada a la Diferencia de Vegetación con respecto al valor medio histórico del índice, adaptada de (Ravelo, 2012).



Tabla 2.6. Clasificación de rangos de valores del NDVI y su paleta de colores definida en el SOS (Ravelo, 2009).

<b>Referencias NDVI</b>		
> +2sd		Muy buenas condiciones
+2sd a +1sd		Buenas condiciones
+1sd a Media		Normal
Media a -1sd		Sequía ligera
-1sd a -2sd		Sequía moderada
<-2sd		Sequía severa

## INDICADORES HIDROLÓGICOS

Los índices hidrológicos utilizados para caracterizar las sequías hidrológicas fueron: el índice de Sequía de Escurrimientos (SDI, por sus siglas en inglés) propuestos por Nalbantis (2008) y el Índice de Estado de las Presas (Ie) que fueron propuestos por MMAE (2005) y adaptado por Ortega (2016), ver Tabla 2.7. Para la estimación de dichos índices se requirió la generación de una base de datos hidrológicos correspondientes a las principales presas y corrientes de agua de la zona en estudio. Para la estimación del SDI se requirieron los registros mensuales de escurrimiento a la entrada de los embalses de las presas y los correspondientes a las estaciones hidrométricas; en cambio, para la estimación del Ie se utilizaron los volúmenes mensuales de ingreso y salida a las presas; así como los niveles del agua al primer día de cada mes. Los períodos de datos fueron variables dependiendo del año de inicio de operación y del registro de datos de cada estación hasta el año en el cual se tienen estimados los volúmenes de escurrimiento. Estos índices permitieron el monitoreo temporal y la evaluación de intensidad de la sequía.

Tabla 2.7. Índices de sequía hidrológica y los programas utilizados en su estimación

INDICE DE SEQUÍA	PROGRAMA	DESCRIPCION
SDI	SDI.EXE	Índice de sequía de escurrimiento (Nalbantis, 2008)
Ie	Ie.EXE	Índice de estado de las presas (MMAE, 2005)

## ÍNDICE DE SEQUÍA DE ESCURRIMIENTO (SDI)

El SDI es un indicador basado en la probabilidad de escurrimientos en cualquier período de tiempo, como por ejemplo en una hidrométrica o la entrada a los embalses de las presas; trabaja de manera similar al índice meteorológico SPI. El cual se representa la evaluación de las características físicas de la sequía hidrológica, mediante los valores del SDI (Tabla 2.8). En donde se indican las fases de la sequía, el criterio de clasificación y su probabilidad de ocurrencia; así la fase de normalidad está representada por valores del SDI que fluctúan entre 1 a -1, la de sequía ligera entre menor a -1 y -2, sequía moderada entre menor a -2 y -3, sequía intensa entre menor a -3 y mayor a -4 y sequía extrema con valores menores o igual a -4.

Tabla 2.8. Clasificación de rangos de valores del SDI y su paleta de colores definida (Nalbantis, 2008) y (Ravelo, 2012).

Estado	Descripción	Criterio	Probabilidad (%)
4	Humedad Extrema	$SDI \geq 4,0$	2,3
3	Humedad Intensa	$3,0 < SDI < 4,0$	4,4
2	Humedad Moderada	$2,0 < SDI < 3,0$	9,2
1	Humedad Ligera	$1,0 < SDI < 2,0$	34,1
0	Normal	$-1,0 < SDI < 1,0$	50
1	Sequía Ligera	$-2,0 < SDI < -1,0$	34,1
2	Sequía Moderada	$-3,0 < SDI < -2,0$	9,2
3	Sequía Intensa	$-4,0 < SDI < -3,0$	4,4
4	Sequía Extrema	$SDI \leq -4,0$	2,3

## ÍNDICE DE ESTADO DE LAS PRESAS (IE)

El Índice de estado (Ie) se utiliza para comparar los datos registrados en los diferentes sistemas de agua y cuantifica la situación actual con respecto al valor promedio histórico, que tomando los valores medios, máximos y mínimos de la variable elegida en cada caso ya sean escurrimientos de los ríos o niveles de almacenamiento de los embalses, transforma la medición en un valor adimensional que varía en un rango comprendido entre 0 y 1 donde el 0 corresponde al valor mínimo histórico y 1 al valor máximo histórico (MMAE, 2005). En la evaluación de las características físicas de la sequía hidrológica,

mediante los valores del  $I_e$ , se utilizó la clasificación propuesta por (Ortega, 2016); la cual se ilustra en la Tabla 2.9:

Tabla 2.9. Valores del índice de estado ( $I_e$ ) y niveles de sequía correspondientes.

Valor del índice	Nivel	Situación
$I_e > 0,50$	Verde	Estable o de normalidad
$0,50 \geq I_e > 0,30$	Amarillo	Prealerta
$0,30 \geq I_e > 0,15$	Naranja	Alerta
$I_e \leq 0,15$	Rojo	Emergencia

La clasificación es convencional de rangos de valores del índice de Estado ( $I_e$ ) Adaptado del (MMAE, 2005) y su paleta de colores definida (Ortega, 2016).

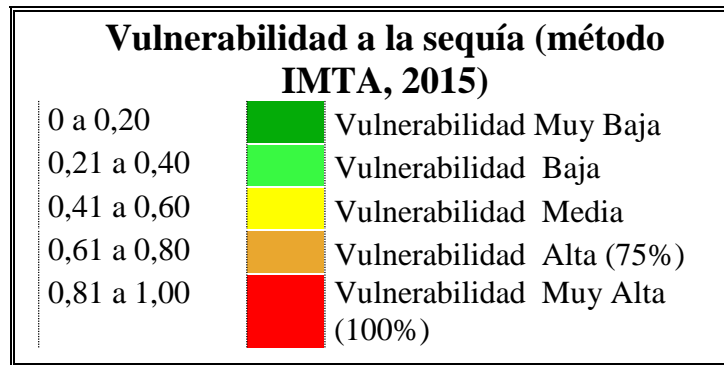
## INDICADORES DE VULNERABILIDAD

La gestión de riesgo requiere de la evaluación, monitoreo y determinación de escenarios por sequías no únicamente meteorológicas, sino también las agrícolas, hidrológicas y socioeconómicas, por lo que es necesario la definición de valores umbrales del fenómeno en los sectores agrícola, hídrico, social, económico y ambiental.

Establecer la vulnerabilidad hidroclimática a las sequías meteorológicas e hidrológicas, mediante la aplicación del SOS del OCPN, requiere de los resultados del monitoreo y pronóstico de sequías meteorológicas e hidrológicas; así como de datos censales, ambientales y económicos. El objetivo final de determinar la vulnerabilidad y riesgo en el OCPN es: Definir las alertas tempranas con base en el SOS ampliado, para contribuir a la resiliencia frente a las sequías recurrentes y a la mitigación de sus impactos.

Para evaluar la vulnerabilidad por sequía en el OCPN se utilizó la clasificación adaptada por el IMTA (Ortega, 2015), ver Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Indicadores de Vulnerabilidad a las sequías determinada por el método propuesto por IMTA (2015).



## BASE DE DATOS

La base de datos para el análisis de la sequía en el OCPN está conformada por datos climatológicos y datos hidrométricos.

### a) Datos climatológicos de estaciones climatológicas, meteorológicas e hidroclimatológicas

La base de datos climatológicas y meteorológicas considerados en el estudio, fueron los registros históricos de 59 estaciones, donde el período del monitoreo fue de 1978 al 2015 con un total de 37 años, para los cuales se determinaron series temporales de datos mensuales de precipitación, temperaturas media, mínima y máxima.

Los sitios de muestreo de las 59 estaciones meteorológicas se observan en la Tabla 2.11 y Figura 2.5, que representa el Indicador del ID del CLICOM (Sistema de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas y significa CLImate COMputing), las coordenadas geográficas, coordenadas UTM y la elevación de cada sitio de muestreo.

Tabla 2.11. Estaciones climatológicas, meteorológicas e hidrométricas en el OCPN y su localización.

Estación	ID	Tipo	Coordenadas Geográficas								Coordenadas UTM			Elevación (msnm)
			Latitud				Longitud				Este	Norte	Zona	
Acaponeta	18001	HC	N	22°	29'	22,9"	W	105°	21'	15,1"	463569	2487108	13	24
Acatitán	25001	HC	N	24°	4'	48,7"	W	106°	39'	59,8"	330571	2664151	13	96
Ahome	25003	C	N	25°	54'	58,7"	W	109°	10'	0,1"	683624	2867740	12	10
Badiraguato	25110	HC	N	25°	20'	29,8"	W	107°	32'	34,4"	244042	2805244	13	191
Batovira	8266	C	N	27°	54'	58,7"	W	107°	53'	59,6"	214577	3091355	13	2160
Cd. Gpe. Victoria	10030	C	N	24°	26'	13,9"	W	104°	7'	16,3"	589090	2702948	13	2000
Chalchihuites	32065	C	N	23°	28'	38,0"	W	103°	53'	15,0"	613611	2596789	13	2313
Choix Estación	25019	HC	N	26°	44'	8,5"	W	108°	20'	45,6"	764002	2959960	12	239
Comedero J. L.	25183	C	N	24°	38'	19,0"	W	106°	49'	29,6"	315285	2726190	13	310
Cucharas	18007	C	N	22°	49'	6,0"	W	105°	18'	18,0"	468701	2523441	13	134
Culiacán	25015	C	N	24°	48'	18,7"	W	107°	24'	23,8"	256716	2745562	13	60
El Carrizo	25022	C	N	26°	15'	58,7"	W	109°	3'	0,4"	694732	2906683	12	8
El Fuerte	25023	C	N	26°	24'	58,7"	W	108°	37'	0,5"	737712	2924029	12	85
El Mahone M. H.	25025	HC	N	26°	29'	58,6"	W	108°	35'	0,2"	740865	2933325	12	140
El Playon	25030	C	N	25°	13'	20,0"	W	108°	11'	25,0"	783089	2792514	12	6
El Quélite	25031	HC	N	23°	31'	28,9"	W	106°	29'	49,9"	347150	2602436	13	49
El Real	10148	HC	N	24°	42'	6,8"	W	106°	32'	7,8"	344664	2732846	13	300
El Rosario	25078	C	N	22°	58'	58,8"	W	105°	50'	60,0"	412878	2541927	13	32
El Sabino J. O.	25032	C	N	26°	28'	58,8"	W	108°	43'	59,9"	725942	2931205	12	104
El Varejonal A. L.	25033	HC	N	25°	5'	38,8"	W	107°	23'	34,4"	258657	2777544	13	119
El Vergel	8061	C	N	26°	27'	58,7"	W	106°	22'	59,9"	362103	2928108	13	2740
El Zopilote	25178	HC	N	25°	43'	51,6"	W	108°	21'	0,4"	765866	2848608	12	37
Eldorado	25161	C	N	24°	17'	58,9"	W	107°	21'	59,8"	259800	2689484	13	10
Fco. Villa	165FVL	HC	N	24°	0'	31,0"	W	103°	57'	46,1"	605494	2655599	13	1977
Guadalupe y C,	8172	C	N	26°	5'	58,6"	W	106°	57'	59,8"	303324	2888244	13	2279
Guamúchil	25037	C	N	25°	28'	36,8"	W	108°	3'	41,4"	795461	2821053	12	44
Guaténipa II	25041	HC	N	25°	20'	33,7"	W	107°	13'	14,5"	276487	2804789	13	512
Higueras de Zaragoza	25042	C	N	25°	57'	60,0"	W	109°	17'	60,0"	670196	2873098	12	11
Huites	25044	HC	N	26°	53'	48,8"	W	108°	21'	45,4"	761973	2977781	12	269
Ixpalino	25045	HC	N	23°	58'	3,7"	W	106°	36'	29,9"	336360	2651623	13	69
Jaina	25046	HC	N	25°	53'	38,8"	W	108°	1'	30,4"	798080	2867376	12	130
La Cruz	25050	C	N	23°	55'	52,0"	W	106°	52'	48,7"	308630	2647904	13	9
La Estancia	18070	HC	N	22°	35'	29,0"	W	105°	20'	30,1"	464881	2498359	13	68
La Huerta	10037	HC	N	25°	21'	48,0"	W	106°	42'	2,0"	328889	2806268	13	670
La Rosilla	10125	C	N	26°	7'	58,8"	W	106°	19'	59,9"	366707	2891133	13	2750
Las Tortugas	25150	HC	N	23°	5'	43,8"	W	105°	50'	44,9"	413377	2554379	13	65
Los Mochis	25116	C	N	25°	47'	58,6"	W	109°	0'	0,4"	700519	2855057	12	11
Mocorito	25064	C	N	25°	29'	0,0"	W	107°	55'	0,0"	206762	2821681	13	87
Obs, Culiacán	25014	M	N	24°	38'	3,8"	W	107°	26'	26,5"	252924	2726697	13	23
Obs, Durango	10017	M	N	24°	3'	40,0"	W	104°	35'	58,9"	540694	2661081	13	1875
Obs, Mazatlán	25062	M	N	23°	14'	51,0"	W	106°	26'	14,6"	352942	2571677	13	1
Obs, Sombrerete	32115	M	N	23°	38'	21,0"	W	103°	38'	9,6"	639127	2614942	13	2350
Pajaritos	18068	HC	N	22°	22'	39,0"	W	105°	1'	14,9"	497855	2474643	13	76

Fuente: Dirección Técnica, OCPN, CONAGUA (2016). C=Climatológica, HC=Hidrométrica y Climatológica y M=Meteorológica.

Cont... Tabla 2.11. Estaciones climatológicas, meteorológicas e hidrométricas en el OCPN y su localización.

Estación	ID	Tipo	Coordenadas Geográficas							Coordenadas UTM			Elevación (msnm)	
			Latitud			Longitud				Este	Norte	Zona		
Peña del Águila	10054	HC	N	24°	12'	19,0"	W	104°	39'	29,0"	534724	2676996	13	1890
Pericos	25071	HC	N	25°	5'	33,7"	W	107°	41'	39,5"	228245	2777963	13	51
Rosamorada	18028	C	N	22°	7'	9,8"	W	105°	12'	42,1"	478170	2446094	13	30
Ruiz (San Pedro)	18032	HC	N	21°	57'	29,2"	W	105°	8'	33,0"	485287	2428222	13	19
Ruiz Cortines	25080	C	N	25°	11'	58,9"	W	108°	13'	0,5"	780480	2789996	12	20
San Joaquín	25172	C	N	25°	40'	0,0"	W	108°	1'	60,0"	797814	2842112	12	144
San Juan	10014	HC	N	25°	34'	47,6"	W	107°	47'	5,6"	220231	2832141	13	467
Sanalona	25081	HC	N	24°	47'	58,9"	W	107°	8'	19,7"	283785	2744496	13	104
Santa Cruz de A	25087	HC	N	24°	29'	13,9"	W	106°	57'	14,8"	301970	2709601	13	109
Santiago Bayacora	10076	C	N	23°	52'	31,8"	W	104°	40'	41,2"	508479	2635773	13	1900
Siqueros	25119	HC	N	23°	21'	20,9"	W	106°	14'	2,8"	373848	2583481	13	40
Sufragio	25009	HC	N	26°	5'	58,6"	W	108°	46'	0,5"	723352	2888674	12	31
Tamazula	10082	HC	N	24°	56'	8,9"	W	106°	58'	29,6"	300575	2759323	13	250
Tubares	8259	HC	N	26°	51'	58,7"	W	107°	59'	59,6"	201923	2975196	13	300
Urique Estación	8192	HC	N	27°	12'	58,7"	W	107°	53'	59,6"	212758	3013760	13	763
Vascogil	10087	C	N	25°	8'	45,0"	W	106°	21'	45,0"	362665	2781790	13	2400

Fuente: Dirección Técnica, OCPN, CONAGUA (2016). C=Climatológica, HC=Hidrométrica y Meteorológica y M=Meteorológica.



Figura 2.5. Estaciones climatológicas, hidrométricas y presas en el Organismo de Cuenca Pacífico Norte

## **CONTROL DE CALIDAD DE DATOS**

Una base de datos actualizada, validada y operativa, es un elemento fundamental de cualquier sistema de monitoreo de las sequías. Por lo que todos los datos fueron sometidos a un estricto control de calidad en lo referente a continuidad, variabilidad, magnitud, consistencia y confiabilidad. Para ello se utilizaron métodos gráficos y estadísticos apropiados. La continuidad fue establecida de forma de no utilizar series incompletas (con datos faltantes) lo cual determinó que una cantidad de estaciones fuera eliminada del sistema. La variabilidad de la serie y magnitud de los datos fueron controlados estadísticamente mediante el uso de parámetros estadísticos (desviación estandar), identificando a aquellas series y/o datos sospechosos. El uso de tres desviaciones ( $p > 0,99$ ) por encima o debajo del valor medio fue utilizado para identificar valores incorrectos. También se realizó una validación cruzada con estaciones vecinas.

Las estaciones meteorológicas fueron seleccionadas por la disponibilidad de series completas o porque las mismas tienen muy pocos datos faltantes además de información en tiempo real. Los archivos generados durante el proceso de recopilación, análisis y procesamiento de los datos originales, algunos fueron obtenidos de registros en papel y otros de archivos de computadora. Luego se procedió a completar las bases de datos necesarias para la operación del sistema de sequías, lo cual implicó la consulta de fuentes primarias de información, análisis de consistencia de calidad, llenado de datos faltantes de acuerdo a criterios estadísticos ya que los programas de los índices no toleran datos faltantes.

### **b) Datos hidrométricos**

Para evaluar los datos hidrométricos se consideraron 16 presas principales y 29 estaciones hidrométricas (identificadas por HC, ver Tabla 2.12), los cuales fueron utilizados en el análisis de la sequía hidrológica, considerándose los escurrimientos mensuales registrados en las hidrométricas a la entrada de los embalses de las presas principales: Luis Donaldo Colosio (Huites), Miguel Hidalgo (El Mahone), Josefa Ortiz de Domínguez (El Sabino), Gustavo Díaz Ordaz (Bacurato), Eustaquio Buelna, Adolfo López



Mateos (El Varejonal), Sanalona, José López Portillo (Comedero) y Aurelio Benassini (El Salto), pertenecientes a la Región Hidrológica No. 10 y las presas Picachos, Santiago Bayacora, Francisco Villa, Guadalupe Victoria, Caboraca y Peña del Águila, que corresponden a la Región Hidrológica No. 11, ver Tabla 2.1; así mismo, en conjunto con los datos mensuales de las variables climatológicas: Temperatura, precipitación y evaporación, de las estaciones con influencia en las cuencas de captación de las principales presas del OCPN, se utilizan para el pronóstico de sequías hidrológicas, mediante el uso de redes neuronales; (Tabla 2.11 y Figura 2.5).

### **Estaciones hidrométricas**

De las 49 estaciones seleccionadas, 29 son hidrométricas combinadas con climatológicas (Acaponeta, Acatitán, Badiraguato, Choix Estación, El Mahone M. H., El Quelite, El Real, El Varejonal, El Zopilote, Francisco Villa, Guatenipa II, Huites, Ixpalino, Jaina, La Estancia, La Huerta, Las Tortugas, Pajaritos, Peña del Águila, Pericos, Ruíz (San Pedro), San Juan, Sanalona, , Santa Cruz de Alaya, Siqueros, Sufragio, Tamazula, Tubares y Urique Estación). Así mismo, en su distribución por cuenca, todas las estaciones alcanzan a cubrir intrínsecamente el territorio del OCPN, como se observa en la Figura 2.5; no obstante, para el análisis hidrológico de cada cuenca en particular se hace un filtrado y se determina cuales estaciones influyen en ella; por ejemplo, para la cuenca del Río Culiacán, siete corresponden a la cuenca (La Huerta, Vascogil, Guatenipa II, Badiraguato, El Varejonal, Sanalona y Culiacán), una a las corrientes independientes que conforman en conjunto con esta cuenca el valle y el acuífero del río Culiacán (Pericos), dando un total de ocho estaciones para estudiar las sequías tanto temporal como espacialmente; para un mejor análisis se consideraron estaciones de cuencas vecinas; en el norte se tienen siete estaciones (dos en la cuenca del río Fuerte: El Vergel y Guadalupe y Calvo, localizadas en el estado de Chihuahua; una localizada en la cuenca del río Sinaloa: Jaina; y cuatro en la cuenca del río Mocorito: San Joaquín, Mocorito, Guamúchil y El Playón); y tres hacia el sur, en la cuenca del río San Lorenzo: Los Altares, El Real y Santa Cruz de Alaya, para un total de 18 estaciones con registros de variables climatológicas.

De la misma manera se determinan las estaciones que influyen en las otras cuencas, como la de los ríos: Fuerte, Sinaloa, Mocorito, San Lorenzo, Elota, Piaxtla, Quérite, de la RH 10 y Presidio, Baluarte, Cañas, Acaponeta y San Pedro de la RH 11.

En las cuencas de los ríos del OCPN, para cada estación hidrométrica, se consideraron los registros mensuales de las variables de precipitación, temperatura y evaporación, los gastos y volúmenes de escurrimiento mensuales; en las presas, los volúmenes mensuales de ingreso y de egreso, así como los niveles de almacenamiento alcanzados al primer día de cada mes.

A continuación se realiza una breve descripción de la base de datos, asociando cada variable con el índice de sequía que se pretende estimar y la probable relación a obtener.

Los valores de precipitación mensual se asocian a los índices de sequía SPI y PDSI, en donde se convierten en datos de entrada de los programas utilizados para la estimación de estos índices, mediante el SOS.

Los datos mensuales de las variables meteorológicas de temperatura y evaporación, se combinan con los datos agrícolas puntuales de humedad del suelo, para formar los registros de entrada a los programas utilizados para estimar los índices de sequía PDSI. De estas variables, los datos de precipitación, temperaturas y evaporación faltantes, se completaron considerando la moda para meses secos y la media para meses húmedos, de las mismas estaciones, conforme a lo sugerido en los cursos internacionales sobre sequía de la OMM en el OCPN (Ravelo, 2007 y 2008); no obstante, existe una gran variedad de métodos para estimar el dato faltante, su elección depende de la precisión con la que se desee determinar (Goicochea, 2002).

Se recopilaron los registros de escurrimiento mensual y de gastos medios diarios, obtenidos de las estaciones hidrométricas, para determinar los años secos, normales y húmedos; así mismo, asociarlos con los índices de sequía SPI (meteorológico) a diferentes escalas de tiempo y el SDI (hidrológico). El período de los registros es variable, con datos

estimados al año 2002 en cauces y al 2015 en los puntos de ingreso a los embalses de las presas.

Para el caso de las presas del OCPN (Tabla 2.12 y Figura 2.5), se obtuvieron los registros mensuales de los volúmenes de ingreso a los vasos y de salida por obra de toma; así como los volúmenes de almacenamiento al día primero de cada mes. Los volúmenes de ingreso se asocian a los índices de sequía SPI (meteorológico) a diferentes escalas de tiempo y SDI (hidrológico), y se determinan los años secos, normales y húmedos; Asimismo, todos estos datos de las presas se asocian con los índices de estado de las presas. El número de años de los registros es variable y se acotó al período de análisis 1978-2015, en la mayoría de las presas; otras, como Bacurato fue desde su inicio de operaciones hasta el año 2015 (período 1980-2015).

Debido a la gran cantidad y variabilidad de los datos hidrométricos, al igual que los climatológicos, se sometieron a un estricto control de calidad en lo referente a continuidad, variabilidad y magnitud, conforme a los criterios aplicados a las variables meteorológicas en el subinciso anterior.

La información descrita está disponible en la Dirección Técnica del OCPN.

#### **c) Datos edafológicos de 49 estaciones**

Se cuenta con los datos edafológicos de todas las estaciones que son requeridos para estimar el PDSI. Esta información se encuentra en la Dirección Técnica del OCPN.

#### **d) Imágenes satelitales que cubren el área del OCPN**

Por otro lado, para la evaluación espacial de la sequía y contrastarla con lo obtenido mediante los índices SPI y PDSI, se utilizó el índice NDVI; el cual para fines de posibilitar el monitoreo y evaluación de las sequías mediante la utilización de imágenes satelitales en tiempo real, se descargó de la página web <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb> durante las

consultorías de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2012), una base de datos de imágenes satélites del índice NDVI para el período 2000-2012 (Ravelo, 2012) y actualizada al 2015 en este trabajo de investigación, para todo el territorio mexicano. Se obtuvieron imágenes satelitales de NDVI del sensor MODIS para períodos mensuales y con una resolución de 1 km. Esta base de datos de 16 años y de aproximadamente 195 imágenes se dispone en formato SIG IDRISI. Si bien el análisis se realizó para el OCPN (conformado por las regiones hidrológicas 10 y 11), la base de datos permitirá realizar análisis similares para las otras regiones hídricas del país. El tamaño total de la base de datos es de aproximadamente 7.4 Gigabytes y se encuentra disponible en la Dirección Técnica del OCPN.

#### **e) Datos censales, ambientales, sociales y económicos**

Los datos censales, ambientales, sociales y económicos fueron proporcionados por INEGI al año 2015, los cuales se pueden visitar en la página Web <http://www.inegi.gob.org> y son utilizados para la estimación de la vulnerabilidad y riesgo por sequía en los Consejos de Cuenca del OCPN (Torrecillas *et al.*, 2013 y 2015).

Estos datos son proporcionados a nivel municipal, por lo que es posible la estimación de la vulnerabilidad por municipios, que al hacer intersección con la amenaza de sequía estimada a escala regional es posible estimar el riesgo de sequías a nivel municipal, de cuenca y Consejo de Cuenca, utilizando el Sistema de Evaluación del Riesgo por Sequía (SERS), (Ravelo, 2012), actualmente conocido como SERES (Sistema de Evaluación del Riesgo Extremo por Sequía; Torrecillas *et al.*, 2015).

#### **f) Datos considerados en las evaluaciones**

En las cuencas de los ríos del OCPN, para cada estación hidrométrica, se consideraron los registros mensuales de las variables de precipitación, temperatura y evaporación, los gastos y volúmenes de escurrimiento mensuales; en las presas, los volúmenes mensuales de ingreso y de egreso, así como los niveles de almacenamiento alcanzados al primer día de cada mes.

## **PROGRAMAS Y SISTEMAS COMPUTACIONALES**

Los programas y sistemas computacionales utilizados, fueron:

IDRISI (TerrSet, 2012): Sistema de Información Geográfica Integrado y Softwares de Percepción Remota, desarrollado por Clark Labs de la Universidad de Clark para el análisis y despliegue de la información digital geoespacial, es utilizado en el monitoreo temporal y espacial de la sequías meteorológicas y en la estimación de la vulnerabilidad y riesgo en los municipios y Consejos de Cuenca del OCPN (Ravelo, 2012 y 2013; Torrecillas *et al.*, 2013).

ARCGIS 2010 (ESRI, 2015): Sistema de Información Geográfica desarrollado para crear mapas, realizar análisis espaciales, administrar datos geográficos y compartir resultados; es usado en el monitoreo de las sequías meteorológicas y la estimación de la vulnerabilidad en los municipios y Consejos de Cuenca del OCPN (Torrecillas, 2015).

SOS (Ravelo, 2009): Sistema Operativo de Sequías, creado para el análisis y monitoreo temporal y espacial de la sequía, adaptado In Situ, para el monitoreo, evaluación y pronóstico de Sequías meteorológicas en el ámbito del Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN/CONAGUA), mediante el Proyecto de Fortalecimiento del Manejo Integrado del Agua (PREMIA); aplicado inicialmente en los trabajos de consultoría para la cuenca del Río Culiacán y posteriormente extendido a todo el OCPN (Ravelo, 2008, 2009, 2010, 2011 y 2012); (Douriet, 2010).

NEUROSOLUTIONS, versión V4.3 (NeuroDimension, 2014), es un software creado para el diseño, entrenamiento y validación de modelos de redes neuronales, para desarrollar una amplia variedad de aplicaciones, entre ellos el análisis multivariado y la predicción de series de tiempo; usado para el pronóstico de sequías meteorológicas (versión para Excel) e hidrológicas durante el desarrollo de estos trabajos.

SDI.XLS (Ravelo, 2011): Programa en Excel desarrollado para estimar los índices de escurrimiento (SDI), usado para determinar dichos índices en las principales presas y corrientes de agua existentes en el OCPN, con base en la metodología propuesta por Nalbantis en 1998, (Nalbantis, 2008).

Ie.XLS (Ortega, 2016): Programa en Excel desarrollado para estimar los índices de estado en cauces y presas; usado para estimar los (Ie) en las principales presas existentes en el OCPN, con base en la metodología propuesta por Nalbantis en 2008, (Nalbantis, 2008).

Errores.xls (Gustavo, 2015): Programa en Excel desarrollado en el CREAM, de la UNC, Argentina, para estimar los errores por los métodos MSE, MSRE, CE, R2, d, MS4E, MAE, RMSE, %RMSE.

InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2008): Software Estadístico.

SIAS (CONAGUA, 2016): Sistema de Información de Aguas Superficiales, creado para actualizar permanentemente la base de datos climatológicos e hidrométricos en toda la República Mexicana, incluyendo a las cuencas del OCPN. [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx).

RHA3 analisis.xls (Torrecillas *et al.*, 2015): Programa para la estimación de la vulnerabilidad a la sequía por municipios, cuencas y consejos de cuenca del OCPN, siguiendo la metodología utilizada para la estimación de la vulnerabilidad a la sequía en el año 2015.

## MÉTODOS

La metodología para el monitoreo, pronóstico, vulnerabilidad y riesgo, y la determinación de escenarios por sequía mediante el Análisis Multivariado Temporal usando Redes Neuronales en el OCPN, se describe con base en el diagrama del proceso para la determinación de escenarios por sequía (Figura 2.6).

El método consiste en seleccionar el área de estudio, y las estaciones climatológicas, hidrométricas y presas con información suficiente y de calidad para el análisis de las sequías meteorológicas e hidrológicas, tanto temporal como espacial; se compila y prepara la base de datos hidroclimatológicos, hidrométricos, edafológicos, digitales y de imágenes satelitales, bibliográficos, censales, ambientales y económicos. Con los datos capturados en los formatos específicos correspondientes, se estiman los índices de sequías meteorológicas SPI a diferentes escalas de tiempo y PDSI, utilizando el Sistema Operativo de Sequías (SOS), obteniendo valores puntuales de los índices por localidad y mapas de variabilidad espacial de la sequía para un mes específico, obtenido por interpolación mediante el método de Kriging (Zavaleta, 2010); y los índices NDVI se estiman con el programa IDRISI, los cuales nos proporcionan información sobre la variabilidad espacial de la sequía meteorológica y agrológica. De igual manera, los índices hidrológicos SDI e Índice de Estado (Ie) se estiman aplicando los programas de cómputo en Excel, SDI.xlsx y Ie.xlsx, respectivamente, con los cuales se determinan las sequías hidrológicas temporales en forma puntual por estación o presa. Con los datos de los volúmenes de escurrimiento Q y los índices del SPI se monitorean y caracterizan a las sequías hidrológicas temporal y espacialmente. Con estos datos resultantes y los datos censales, ambientales, sociales y económicos se estiman la vulnerabilidad y riesgo de sequías por cuenca y municipios que integran el OCPN. En la estimación de la vulnerabilidad se utilizó la metodología propuesta por Ravelo (2012) y el IMTA (2015) utilizando el programa RHA3 analisis.xls y el riesgo mediante el SERES, creado en plataforma IDRISI por Ravelo (2012), determinando con ello escenarios de sequías meteorológicas e hidrológicas actuales e históricos (tiempo i) para diferentes condiciones de clima (escenarios climáticos).

Los índices meteorológicos e hidrológicos históricos estimados, se utilizan para pronosticar mediante redes neuronales las condiciones de sequía para los siguientes tres meses (tiempo  $i+1,2,3$ ). Para el caso de las sequías meteorológicas, los índices SPI y PDSI entran como datos de entrada al programa Neurosolutions.xlsx y mediante la metodología proporcionada por Ravelo (2008) se estiman los índices de sequía para los siguientes tres meses ( $SPI_{i+1,2,3}$  y  $PDSI_{i+1,2,3}$ ). En cambio, para el pronóstico de sequías hidrológicas, se usan como insumo los datos históricos de escurrimiento mensuales ( $Q_i$ ) registrados en las estaciones hidrométricas y los volúmenes de ingreso a los embalses de las presas. Los datos de las variables climatológicas como la precipitación, temperaturas y evaporación de las estaciones climatológicas con influencia en la cuenca de aportación; y el índice de escurrimiento SDI, al programa Neurosolutios.exe y mediante la metodología propuesta que se describe más adelante, se estiman los valores de los escurrimientos probables de los siguientes tres meses ( $Q_{i+1,2,3}$ ) y su índice de escurrimiento respectivo ( $SDI_{i+1,2,3}$ ). La estimación de la vulnerabilidad se lleva a cabo, considerando como insumo los datos de los índices SPI y PDSI pronosticados para los siguientes tres meses ( $SPI_{i+1,2,3}$ ;  $PDSI_{i+1,2,3}$ ) y las proyecciones de los datos censales, ambientales, sociales y económicos, aplicando la metodología anteriormente descrita.

Con los resultados de los índices pronosticados, meteorológicos ( $SPI_{i+1,2,3}$  y  $PDSI_{i+1,2,3}$ ) e hidrológicos ( $Q_{i+1,2,3}$ ,  $SDI_{i+1,2,3}$ ) y las proyecciones de vulnerabilidad, se determinan para los siguientes tres meses los escenarios de sequías mediante el análisis multivariado temporal usando redes neuronales en el Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN).



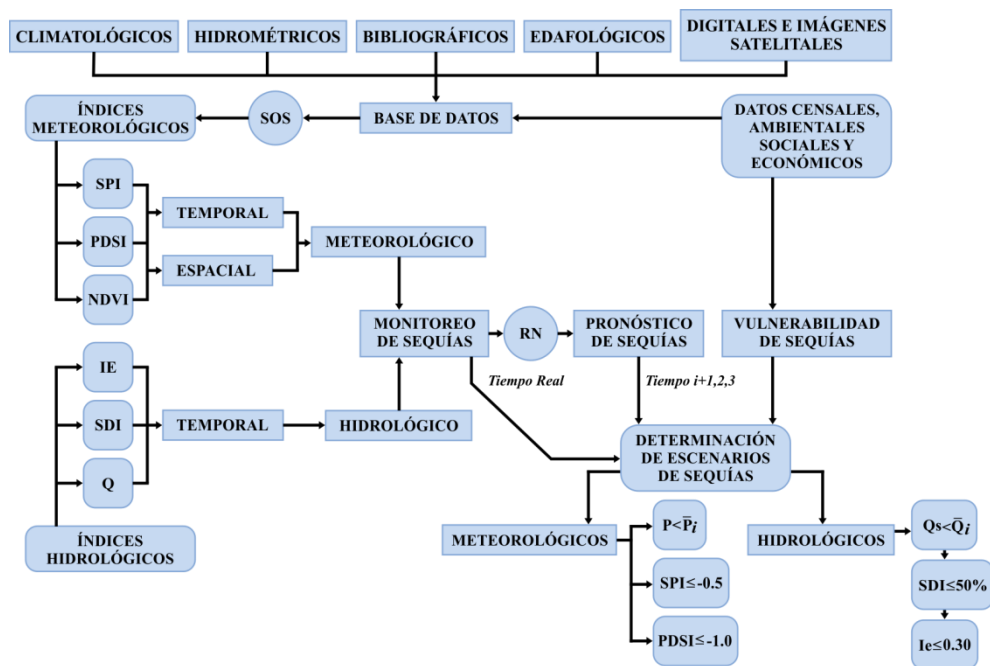


Figura 2.6. Diagrama del proceso para la determinación de escenarios por sequía.

## MONITOREO TEMPORAL Y ESPACIAL DE LAS SEQUÍAS METEOROLÓGICAS E HIDROLÓGICAS

En este subcapítulo se describen las metodologías para el monitoreo y análisis temporal y espacial de las sequías meteorológicas e hidrológicas, mediante los pasos que se indican en la sección correspondiente:

### MONITOREO TEMPORAL Y ESPACIAL DE SEQUÍAS METEOROLÓGICAS

En esta sección se describe la metodología para monitorear temporal y espacialmente las sequías meteorológicas, mediante los índices meteorológicos SPI y PDSI, y satelital (NDVI), en el OCPN; utilizada en el Proyecto de Sequías del OCPN (Douriet, 2010; Ravelo; 2009, 2010, 2011 y 2012). Los pasos que sigue la metodología son:

- Selección de estaciones meteorológicas
- Compilación y preparación de las bases de datos

- Estimación de los índices de sequía
- Análisis y evaluación de los índices de sequías: SPI, PDSI y NDVI
- Determinación de las características físicas de las sequías

### **Selección de estaciones meteorológicas**

La selección de estaciones para el monitoreo temporal y espacial de la sequía en el OCPN, se llevó a cabo sobre la base del inventario geográfico de las redes de estaciones hidroclimatológicas, existente en la Dirección Técnica del OCPN, se realizó un filtrado, mediante el uso del programa Arc Gis 10.1 (ESRI, 2010), para seleccionar las estaciones que influyen en la zona de estudio. De 245 estaciones existentes, 64 se encuentran dentro de la zona en estudio y cumplen con los requisitos de longitud de registro (al menos 30 años), continuidad, variabilidad, magnitud y la disponibilidad a tiempo real (Ravelo *et al.*, 2014; Douriet, 2010); para determinar su confiabilidad y consistencia mediante métodos gráficos y estadísticos (Bois, 1971; Kendall *et al.*, 1999).

Finalmente, después del filtrado de datos, quedaron 49 estaciones seleccionadas con registros completos y con calidad adecuada para el monitoreo de la sequía en el OCPN, mediante la aplicación del SOS (Sistema Operativo de Sequías), que calcula de los índices de sequía: SPI y PDSI utilizados en el monitoreo temporal y espacial de las sequías (Ravelo, 2012). La relación de estaciones se muestran en la Tabla 2.12 y se ilustra su ubicación en la Figura 2.5, del subcapítulo de Base de datos.

### **Compilación y preparación de la base de datos meteorológicos**

Se desarrolló la base de datos físicos, correspondiente a las estaciones meteorológicas, previamente seleccionados, para el período 1978-2015, Para cada estación meteorológica, se consideraron los registros mensuales de las variables de precipitación, temperatura y evaporación; tal y como se indica en el subcapítulo de la base de datos.

### **Estimación temporal de los índices de sequía: SPI y PDSI**

Sobre la base de los aspectos metodológicos de los índices SPI, PDSI y NDVI, descritos en los siguientes subcapítulos, en donde se detallan sus alcances y limitantes; así como la aplicación de los programas desarrollados para cada índice en particular a los registros de la base de datos descrita anteriormente, se estimaron cada uno de los dos primeros índices puntuales (SPI y PDSI) para cada una de las 49 estaciones meteorológicas seleccionadas, utilizando el Sistema Operativo de Sequías (SOS). Así mismo, se determinó la normal climatológica de precipitación para el Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN), correspondiente al período 1978-2015.

### **Estimación espacial de los índices de sequía: SPI, PDSI y NDVI**

Para el análisis de la variabilidad espacial de la sequía, sobre la base de la serie de valores puntuales de los índices estimados el, SOS grafica espacialmente las sequías de manera automática, para cada mes seleccionado y como apoyo de forma comparativa se estimó la sequía espacial utilizando el índice de sequía NDVI, mediante el Softwares IDRISI.

### **Normal climatológica de precipitación en el OCPN**

Considerando un registro histórico de lluvia, para un período dado puede estimarse el valor medio que se esperaría ocurriera. Esto sería lo normal o esperado. De acuerdo con Linsley *et al.*, (1978), la normal climatológica debe calcularse para periodos de 30 años. Mayor tiempo puede llevar implícitos cambios naturales o antropogénicos que desvirtúen la información. Periodos menores pueden no reflejar completamente las cualidades del fenómeno a analizar.

En este caso se estimaron las normales climatológicas de precipitación anual, mensuales acumuladas y sin acumular, en el período 1978-2015, para cada una de las estaciones seleccionadas y con base en ello su variabilidad espacial en el OCPN; los

resultados se muestran en el siguiente capítulo. Las normales climatológicas de lluvias mensuales dan una idea clara de cómo se distribuye la lluvia esperada en los diferentes meses del año, en las cuencas; con estas normales de lluvia de 38 años consecutivos de información, y en combinación con la normal mensual de temperatura, se generaron los climogramas para cada una de las estaciones seleccionadas.

También se generaron las normales mensuales acumuladas para efectos de seguimiento, ya que se facilita la comparación de lo que se esperaría que lloviera hasta determinado mes, contra lo que realmente ha llovido. Esta comparación de los valores acumulados nos da una idea cuantitativa del tamaño del déficit de la sequía y nos ilustra si el año es seco, normal o húmedo. Además, debido a que la mayor cantidad de precipitación ocurre durante el verano, se estimaron las normales de precipitación acumulada para los tres meses más lluviosos del año, que en esta zona son: julio, agosto y septiembre, ya que el déficit que se presente en este período tendrá mayor impacto en los usos del agua.

Los resultados de las normales de precipitación y los climogramas de la estación Culiacán, se muestran en el capítulo 3 Resultados y Discusión.

Para el OCPN se determinó la Normal Climatológica de Precipitación por el método de las Isoyetas, la cual se muestra en el capítulo de resultados. La información anterior, nos sirve de base para que con criterios previamente definidos, como son los índices podamos caracterizar una sequía, o bien, determinar si el año es húmedo o seco.

Entre los índices de sequía más usuales se tiene: Porcentaje de la Normal (PN), Variabilidad de la Precipitación Anual (VPA), Deciles de Precipitación (DP), índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI), Índice Palmer de Sequía Hidrológica (IPSH), Índice de Humedad de los Cultivos (CMI), Índice de Precipitación Estandarizada (SPI), e Índice Normalizado de la Diferencia de Vegetación (NDVI), como se indica en la literatura diversa (Escalante y Reyes, 2000; Velasco, 2002; Ravelo, 2008).

A continuación se describen brevemente los índices: SPI, PDSI y el NDVI, utilizados en el desarrollo de este trabajo:

### **Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)**

En la estimación del SPI a diferentes escalas de tiempo y su graficado espacial se utilizó el programa de computación SPI.exe y el Sistema Operativo de Sequías (SOS) (Ravelo, 2008 y 2009).

En la evaluación de las características físicas de la sequía, mediante los valores del SPI a diferentes escalas de tiempo y su representación espacial se utilizó la clasificación propuesta por Hayes (2000), quién partió de la escala original de McKee *et al.* (1993); como se ilustra en la Tabla 2.4. Además, se ilustra la paleta de colores, definida específicamente para la evaluación de la sequía en el OCPN (Ravelo, 2012 y Douriet, 2010).

Utilizando los datos de entrada de precipitación mensual, en el SOS, se estimaron los índices de sequía por estación, para diferentes escalas de tiempo, desde 1 hasta 48 meses, y se graficaron espacialmente para cada mes de interés.

Los resultados de estos índices y el análisis de su variabilidad espacial realizada para el año más seco, el más húmedo y el normal, durante el período 1978-2015, se describe en el capítulo 3 Resultados y discusión.

Entre las ventajas de este indicador (SPI), se puede mencionar que es aplicable para diferentes escalas de tiempo, como se indica en párrafos anteriores, lo que nos puede dar una señal de alerta temprana de la sequía, que ayuda a valorar la intensidad de la misma (Zanvettor y Ravelo, 2000; CREAN, 2007).

Las escalas más usuales y lógicas para el SPI son: una escala temporal de uno a tres meses para la sequía de corto plazo, asociada a las de tipo meteorológica y agrícola, considerando en este caso los períodos estacionales correspondiente a la temporada de lluvias (julio, agosto y septiembre) y de estiaje (abril, mayo y junio), así como para las lluvias acumuladas, correspondientes. La escala de 6 meses para evaluar la sequía de mediano plazo; y las escalas de 12 a 24 meses, para las sequías de largo plazo, hidrológica y geohidrológica. Por tanto, para un mes y año específicos, el valor del SPI depende de la escala de tiempo con que se haya calculado.

### **Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI)**

El objetivo de este índice es ofrecer medidas normalizadas de las condiciones de humedad, para poder establecer comparaciones entre distintos lugares y entre períodos diferentes. Se calcula con base en datos termo-pluviométricos y de contenido de agua disponible del suelo. A partir de los datos de entrada (Evapotranspiración potencial y precipitación) se pueden calcular todos los términos básicos de la ecuación del balance de agua, incluyendo la evapotranspiración, la recarga del suelo, la escorrentía y la pérdida de humedad del horizonte considerado (Ravelo, 2008; Douriet, 2010).

Sobre la base de los datos de entrada: precipitación mensual (mm), humedad del suelo (mm) y valores de evapotranspiración potencial (mm), mediante el SOS (Ravelo, 2009), se estimaron los índices de sequía por estación, graficándose espacialmente para cada mes de interés.

El índice de Palmer es muy reconocido porque ofrece a los responsables de la toma de decisiones una medida de las anomalías meteorológicas recientes, para una región determinada, da una oportunidad para situar las condiciones actuales en la perspectiva histórica, y proporciona representaciones en el espacio y en el tiempo de las sequías históricas (Ravelo, 2008).

Los resultados obtenidos y el análisis de su variabilidad temporal y espacial, para los años más secos, húmedos y normales dentro del período 1978-2015, se muestran en el capítulo siguiente.

### **Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI)**

En la estimación del índice NDVI, a menudo no es directamente el valor de una sola imagen el que se usa como un indicador, sino un valor que represente las características seleccionadas de una serie de tiempo. En este proceso de comparación se considera la imagen promedio procesadas por mes; esta información satelital está disponible en tiempo real, a un costo relativamente bajo y los equipos de comunicación satelital requeridos son económicos (Ravelo, 2008 y 2012; Douriet, 2010).

Las ventajas de la utilización de información satelital pueden resumirse en los siguientes puntos (Ravelo, 2012):

- Gratuidad (Disponibles gratuitamente a través de INTERNET).
- Poseen una amplia cobertura geográfica a nivel mundial.
- Tiene una escala adecuada para distintas aplicaciones.
- Son de rápido procesamiento mediante la utilización de programas disponibles y equipos de computación adecuados.
- Es posible la actualización de las bases de datos en tiempo real.
- Permiten reforzar y complementar a la información meteorológica y ambiental terrestre.

Los pasos que se siguen desde la conformación de la base de imágenes satelitales, hasta estimar el NDVI son (Ravelo, 2012):

- a) Selección del área de estudio
- b) Compilación de la base de datos de las imágenes satelitales NDVI
- c) Procesamiento de las imágenes en el formato IDRISI
- d) Estimación de la imágenes promedio mensual

- e) Cálculo de las desviaciones (anomalías) con respecto al valor medio
- f) Calibración de las imágenes mediante valores de índices de sequía
- g) Determinación de la condición de la vegetación en diferentes condiciones climáticas.

**a) Selección del área de estudio**

El área de estudio de la Región Hidrológica Administrativa III Pacífico Norte (RHAIIPN) que, con base en sus coordenadas extremas, se entra al repositorio de datos satelitales de la NASA/EOSDIS, en donde le corresponden las imágenes satelitales del sector H8V6.

**b) Compilación de la base de datos de las imágenes satelitales NDVI**

De acuerdo al período de análisis, en este caso 2000-2015, se accede al recuadro H8V6 del repositorio de datos satelitales y se descargan las imágenes satelitales mensuales del NDVI del sensor MODIS, desde el repositorio de datos satelitales de la NASA/EOSDIS.

**c) Procesamiento de las imágenes en el formato IDRISI**

Se generan los archivos raster (.rdc) de las imágenes MODIS/NDVI y MODIS/EVI para ser usadas en ambiente IDRISI, conforme al Tutorial para el procesamiento de imágenes MODIS, para los productos NDVI-EVI de resolución de 1 km, denominado MOD13A3 (Ravelo, 2012).

La finalidad es detectar cambios o desvíos de la condición media en alguna zona de interés. En el tutorial se describen todos los pasos previos de preparación de archivos, que son necesarios para llegar a ese último proceso. Por lo tanto, el procesamiento lo divide en 3 partes: 1- Importar datos a IDRISI, 2- Control y corrección de calidad de datos, 3- Cálculo estadístico de series de tiempo.



#### **d) Estimación de la imágenes promedio mensual**

Para la estimación de las imágenes promedio mensual se crea un grupo raster, denominado raster group file (rgf) para cada mes de la serie de imágenes NDVI y EVI; usando ese rgf para calcular la imagen promedio mensual y la desviación estándar para esa fecha, usando las funciones de IDRISI.

#### **e) Cálculo de las desviaciones (anomalías) con respecto al valor medio**

Con base en la imagen del promedio mensual, de acuerdo a la fecha que se elija, se calculan las desviaciones (anomalías) calculando la diferencia entre los valores promedio y los correspondientes al de la fecha elegida, usando las funciones de IDRISI, por ejemplo se puede calcular la imagen diferenciada entre la imagen promedio y una imagen de julio de 2015. Donde los valores de la imagen de diferencia se clasifican con base a las fases de la sequía y la paleta de colores del NDVI (Ravelo, 2012).

Las anomalías negativas obtenidas podrían indicar áreas con sequías, por lo que es necesario establecer relaciones con los valores de los índices meteorológicos de sequía (SPI, PDSI). Esto permite calibrar las anomalías del NDVI con dichos índices.

Debido a la gran cantidad de imágenes que se procesan, se creó in situ durante los trabajos de consultoría de la OMM al OCPN para el Proyecto de sequías del OCPN un sistema de procesamiento automático de imágenes para obtener las anomalías del NDVI, mediante el sistema Macro Modeler de IDRISI (IMM).

#### **f) Calibración de las imágenes mediante valores de índices de sequía**

Mediante un análisis de regresión se establece la función entre las imágenes MODIS/NDVI con pixeles de |1 kilómetro por 1 kilómetro y los índices de sequía (SPI y PDSI) mensual para todas las estaciones de la red en el OCPN. Se tabulan los resultados y grafican las regresiones para algunas estaciones y meses selectos.

Utilizando las funciones de regresión obtenidas, se calibra el NDVI de forma de obtener escalas numéricas y las cromáticas asociadas que sean representativas de situaciones de sequía, normalidad y exceso de humedad según corresponda.

#### **g) Determinación de la vegetación en diferentes condiciones climáticas**

Sobre la base de los resultados anteriores se lleva a cabo un monitoreo de las sequías usando solamente la información satelital y se confronta con el monitoreo usando índices de sequías (PDSI y SPI), para diferentes estados climáticos de sequía, normalidad y exceso de humedad.

Para el manejo y análisis de las imágenes del NDVI se utilizó el Sistema de Información Geográfica IDRISI TerrSet (2012). El programa y la base de datos de imágenes mensuales del Sensor MODIS para el período 1998-2015, están disponibles en la DT-OCPN-CONAGUA. En el capítulo siguiente, se muestra un ejemplo de los resultados temporales y espaciales obtenidos hasta el momento, mediante este índice.

#### **❖ Análisis y evaluación de los índices de sequía: SPI, PDSI y NDVI.**

Dadas las características de las sequías en cuanto a su falta de periodicidad y de estacionalidad, no es posible el análisis de series de tiempo mediante la utilización de modelos auto regresivo y distribución de frecuencias en modelos paramétricos para el pronóstico de sequías (Ravelo, 2009; Douriet, 2010).

Por ello se efectuó un análisis y evaluación a las series de tiempo (período 1978-2015) de los índices de sequía SPI y PDSI, obtenidas mediante la estimación descrita en el punto anterior, considerando las fases de sequías respectivas para cada índice. Además, se analiza el suavizado de las series de tiempo del SPI que se genera al incrementar la escala de tiempo de 1 a 48 meses, debido a que este índice analiza períodos móviles.

Los resultados puntuales (series de tiempo del período 1978-2015) obtenidos para los índices SPI y PDSI, se tabularon y graficaron para facilitar el análisis comparativo entre métodos o entre diferentes escalas de tiempo (caso del SPI), para cada una de las estaciones.

Para observar el comportamiento regional de la sequía, para cualquier mes o período de tiempo de interés, dentro de la zona en estudio, se elaboraron gráficas espaciales para los índices SPI a diferentes escalas de tiempo y PDSI, mediante el sistema SOS.

Se compara, para los períodos de sequía, normales y húmedos, el comportamiento puntual y espacial de la precipitación con los resultados obtenidos para los índices de sequía SPI a diferentes escalas de tiempo y el PDSI, obtenidos en el subinciso anterior.

Los resultados del índice NDVI, para los períodos de sequía, normales y húmedos, se comparan con los mapas espaciales de los índices de sequía SPI y PDSI de sequía, obtenidos en el punto anterior.

En el Capítulo 3 se muestran los resultados del análisis y evaluación de los índices de sequía SPI, PDSI y NDVI, descritos en este subcapítulo.

#### **❖ Determinación de las características de las sequías meteorológicas**

Sobre la base de las series de tiempo y de la clasificación de sequías anteriormente descritas, para cada uno de los índices SPI, PDSI y NDVI así como en los resultados del análisis y evaluación puntual y espacial de los índices, se determinan las características físicas de las sequías, en cuanto a severidad, duración, intensidad o magnitud, extensión y frecuencia de las sequías en la zona en estudio.

En el siguiente capítulo se muestran los resultados obtenidos para las estaciones Culiacán, Sanalona, Varejonal, Huites, Bacurato y Comedero.

## MONITOREO TEMPORAL DE SEQUÍAS HIDROLÓGICAS

En esta sección se describe la metodología para monitorear y analizar temporalmente las sequías hidrológicas, utilizando los índices de escurrimiento SDI (Nalbantis, 2008) y del estado de las presas  $I_e$  (MMAE, 2016), en las principales corrientes y presas existentes en el OCPN.

La metodología para estimar el índice de escurrimiento SDI se aplicó durante el desarrollo del Proyecto de Sequías del OCPN (Ravelo, 2012; Torrecillas *et al.*, 2013 y 2015) y la metodología para estimar el índice de presas  $I_e$ , se aplicó en algunas presas de México (Ortega, 2016). Los pasos de la metodología para monitorear y analizar temporalmente las sequías hidrológicas, son:

- ❖ Selección de estaciones hidrométricas en corrientes y presas principales
  - ❖ Compilación y preparación de las bases de datos
  - ❖ Estimación de los índices de sequía hidrológica SDI e  $I_e$
  - ❖ Análisis y evaluación de los índices de sequías: SDI e  $I_e$
  - ❖ Determinación de las características físicas de las sequías
- 
- ❖ **Selección de estaciones hidrométricas en corrientes y presas principales**

La selección de estaciones para el monitoreo temporal de las sequías hidrológicas en el OCPN, se llevó a cabo sobre la base del inventario geográfico de las redes de estaciones hidrométricas y principales presas, existentes en la Dirección Técnica del OCPN. Se realizó un filtrado, mediante el uso del programa Arc Gis 10.1 (ESRI, 2010), para seleccionar las estaciones que influyen en la zona de estudio. Se relacionan un total de 30 hidrométricas y 16 presas que se encuentra dentro de la zona en estudio y cumplen con los requisitos de longitud de registro, continuidad, variabilidad, magnitud y la disponibilidad a tiempo real; para determinar su confiabilidad y consistencia mediante métodos gráficos y estadísticos (Bois, 1971; Kendall *et al.*, 1999). Después del filtrado de datos se eliminó una estación hidrométrica reduciéndose a 29.

Con los registros completos y con calidad adecuada de los escurrimientos mensuales, volúmenes de ingreso y los niveles del agua en las presas se estimaron los índices SDI e Ie para el monitoreo de la sequía hidrológica en el OCPN usando los programas SDI.xls (Ravelo, 2012) e Ie.xls (Ortega, 2016), respectivamente. La relación de estaciones se muestra en la Tabla 2.12 y se ilustra su ubicación en la Figura 2.5, del subcapítulo Base de datos.

#### ❖ **Compilación y preparación de las bases de datos**

Los escurrimientos mensuales registrados en las hidrométricas, localizadas en cauces y puntos de ingreso al embalse de las presas, utilizados para calcular el SDI y los volúmenes mensuales de ingreso y de salida de las presas; así como, los almacenamientos al primer día de cada mes usados para estimar los Ie se preparan en tablas de Excel conforme al formato que pide cada programa.

#### ❖ **Estimación de los índices de sequía hidrológica (SDI) e índice de Estado (Ie).**

#### **Estimación del índice de Sequía Hidrológica SDI**

Se utilizó el SDI para caracterizar las sequías hidrológicas (Nalbantis, 2008), considerando períodos variables según la longitud del registro de cada una de las estaciones hidrométricas, los cuales se preparan en tablas ad hoc, conforme lo requiere el programa SDI.xlsx.

Se calculan los valores de los índices SDI para cada mes, se clasifican en 5 categorías y se le asigna la paleta de colores, asociada a un nivel de intensidad de sequía hidrológica, en conformidad con la Tabla 2.8. Clasificándola en sin sequía, sequía ligera, sequía moderada, sequía intensa y sequía extrema. Con estos índices se monitorea y evalúa temporalmente la intensidad de la sequía hidrológica.

## **Volumen de escurrimiento mensual (Q)**

Los escurrimientos mensuales registrados en las hidrométricas de los principales ríos y a la entrada de los embalses de las principales presas del OCPN, se grafican con respecto al tiempo, se determina su valor medio móvil y se analiza su comportamiento por décadas, observando donde hay un quiebre en la curva de gastos, detectando con ello las diferentes tendencias y determinando si ese mes o año es húmedo, normal o seco con respecto a su media histórica.

En este caso se estimaron las normales del escurrimiento anual, mensual acumulada y sin acumular, en un período variable, desde el inicio de operaciones de cada una de las estaciones seleccionadas hasta el año 2015; los resultados se muestran en el Capítulo 3. Las normales de escurrimiento mensual dan una idea clara de cómo se distribuye el escurrimiento esperado en los diferentes meses y cada estación del año, como aportación de su cuenca aguas arriba.

También se generaron (para cada una de las estaciones hidrométricas), las normales mensuales acumuladas para efectos de seguimiento, ya que se facilita la comparación de lo que se esperaba que escurriera hasta determinado mes, contra lo que realmente ha escurrido. Esta comparación de los valores acumulados nos da una idea cuantitativa del tamaño del déficit de la sequía hidrológica y nos ilustra si el año es seco, normal o húmedo. Además, debido a que la mayor cantidad de escurrimiento ocurre durante el verano, se estimaron las normales de escurrimiento acumulado para los tres meses más lluviosos del año, que en esta zona son julio, agosto y septiembre, ya que el déficit que se presente en este período tendrá mayor impacto en los usos del agua.

Los resultados de las normales de escurrimiento de la estación hidrométrica Varejonal, Sanalona y Eustaquio Buelna, se muestran en el Capítulo 3.

## Estimación del índice de Sequía Hidrológica $I_e$ (índice de estado de las presas)

Los índices de Estado ( $I_e$ ), pueden utilizarse como una herramienta para la toma de decisiones en la operación de los distritos de riego, ya que tienen como finalidad hacer comparables los datos recogidos en diferentes sistemas de distribución de agua y cuantificar la situación actual respecto de la histórica (Ortega, 2016).

El índice de estado se estimó tomando los valores medios, máximos y mínimos de la variable elegida en cada caso (ya sean escurrimientos de los ríos o niveles de almacenamiento de los embalses), transformando la medición en un valor adimensional que varía en un rango comprendido entre 0 (correspondiente al valor mínimo histórico) y 1 (correspondiente al valor máximo histórico), tal como se indica en las expresiones siguientes:

$$\text{Si } V_i \geq V_{med} : I_e = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{V_i - V_{med}}{V_{max} - V_{med}} \right] \quad (1)$$

$$\text{Si } V_i < V_{med} : I_e = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{V_i - V_{mín}}{V_{med} - V_{mín}} \right] \quad (2)$$

Dónde:

$V_i$  = Valor de la medida obtenida en el mes de seguimiento;

$V_{med}$  = Valor medio en el periodo histórico;

$V_{max}$  = Valor máximo en el periodo histórico;

$V_{mín}$  = Valor mínimo en el periodo histórico.

Las expresiones anteriores se establecen teniendo en cuenta que la media aritmética es uno de los estadísticos más robustos, a la vez que más sencillo de calcular; por lo que una comparación del dato del indicador con la media de la serie histórica, se ajustará más convenientemente, en principio, a la situación real de la zona de sequía seleccionada, si bien, deben tenerse en cuenta también los valores máximos y mínimos históricos, tal como queda reflejado en las fórmulas del  $I_e$ .

En función de los datos disponibles para cada sistema de abastecimiento (en este caso, para cada distrito de riego) se calcula el  $I_e$ . Para ello se toman como valores medios, máximos y mínimos los resultantes del estudio de los escurrimientos en el caso de los sistemas no regulados, o los resultantes de los niveles y aportaciones de agua a los embalses si el sistema es regulado.

Así, con el fin de conocer el  $I_e$  de un sistema no regulado, se utilizan los valores de las aportaciones de agua en la estación de aforos que haya sido seleccionada como representativa del sistema, a partir de las cuales se obtiene el Índice de Escurrimiento ( $I_f$ ). En el caso de sistemas regulados, el cálculo de los indicadores se realiza a partir de los datos recogidos en el embalse o embalses que caracterizan la cuenca o el sistema hidráulico, partiendo de los datos de nivel de embalse al inicio de cada mes, para obtener de ahí el Índice de Embalse ( $I_{emb}$ ).

Si el sistema depende tanto de recursos regulados como de no regulados, o cuando dependiendo de recursos regulados, sea necesario distinguir entre volumen de embalse y aportaciones al mismo, se construye un índice mixto que pondera ambos componentes: las aportaciones al embalse, a partir de las cuales se obtiene el Índice de Escurrimiento ( $I_f$ ), y el volumen de agua embalsada al inicio de cada mes, del que se obtiene el Índice de Embalse ( $I_{emb}$ ), aplicando en ambos casos las ecuaciones 1 y 2. El indicador final es, por tanto, un Índice de Estado Mixto ( $I_m$ ), vinculado a la aportación media anual del embalse ( $A_m$ ):

$$I_m = \left[ I_{emb} * \left( \frac{1}{2} * \frac{V_{\text{útil}}}{A_m} \right) \right] + \left[ I_f * \left( 1 - \left( \frac{1}{2} * \frac{V_{\text{útil}}}{A_m} \right) \right) \right] \quad (3)$$

Dónde:

$I_m$  = Índice de Estado Mixto, adimensional;

$I_{emb}$  = Índice de Embalse, adimensional;

$I_f$  = Índice de Escurrimiento, adimensional;

$V_{\text{útil}}$  = Volumen de almacenamiento útil,  $\text{hm}^3$ ;



$A_m$  = Aportación media anual de agua,  $hm^3$ .

En caso que el sistema se caracterice por la aportación de una estación de aforo determinada y el volumen de un embalse, el  $I_m$  se calcula de forma similar a lo explicado, pasando el  $I_f$  a determinarse a partir de las aportaciones registradas mensualmente en la estación de aforos considerada para el sistema en estudio, aplicando las ecuaciones 1 y 2, utilizando el programa *Ie.xlsx*.

El rango de valores de cada uno de los Índices de Estado ( $I_f$ ,  $I_{emb}$  o  $I_m$ ), que como se ha señalado va de 0 a 1, se discretiza convencionalmente, en principio, a efectos de diagnóstico de la situación de sequía, en los cuatro niveles que se presentan en la Tabla 2.9, del punto Índice de Estado de las Presas ( $I_e$ ), del subcapítulo Indicadores normativos de las fases de la sequía.

#### ❖ **Análisis y evaluación de los índices de sequías: SDI, $I_e$ y Q**

Se efectuó un análisis y evaluación a las series de tiempo, desde el inicio de operación de las hidrométricas y presas hasta el año 2015, de los índices de sequía SDI y  $I_e$ , obtenidas mediante la estimación descrita en el punto anterior, y considerando las fases de sequías respectivas para cada índice (ver punto Indicadores normativos de las fases de la sequía).

Los índices SDI se estimaron mediante el programa *SDI.xlsx* y los índices  $I_e$  mediante el programa *Ie.xlsx*, obteniéndose en cada caso una sola serie de tiempo por estación para cada índice, cuyos valores son representativos para el largo e inmediato plazos, respectivamente. Los resultados obtenidos para los índices SDI y  $I_e$ , se tabularon y graficaron para facilitar el análisis comparativo, para cada una de las estaciones.

Se compara, para los períodos de sequía, normales y húmedos, el comportamiento puntual temporal de los escurrimientos (Q) con los resultados obtenidos para los índices de sequía SDI y  $I_e$ .

En el Capítulo 3 se muestran los resultados del análisis y evaluación de los índices de sequía hidrológica SDI, Ie y Q.

Se hace un análisis comparativo entre las normales de escurrimiento anual, correspondiente a los tres meses de mayor escurrimiento y la de los tres meses más secos del año (período de estiaje), para determinar los años húmedos, normales y secos; esto es, definir los períodos y años con sequía, estimar si ha habido desfases en los periodos de mayor escurrimiento, su magnitud para realizar el análisis de las repercusiones y las medidas de mitigación necesarias.

Se correlacionan los resultados de los períodos húmedos, normales y secos con los valores del SDI e Ie históricos.

#### ❖ **Determinación de las características de las sequías hidrológicas**

Sobre la base de las series de tiempo y de la clasificación de sequías, anteriormente descritas, para cada uno de los índices SDI e Ie; así como en los resultados del análisis y evaluación puntual temporal de los índices, se determinan las características físicas de las sequías, en cuanto a severidad, duración, intensidad o magnitud, extensión y frecuencia en la zona en estudio.

En el Capítulo 3 se muestran los resultados obtenidos para las estaciones Sanalona, Varejonal, Huites, Bacurato, Comedero, Eustaquio Buelna y Miguel Hidalgo.

Los resultados de la evaluación puntual temporal de la sequía hidrológica, mediante los índices SDI e Ie, determinados conforme a la metodología descrita; así como el análisis de los escurrimientos Q, registrados en las estaciones hidrométricas, llevada a cabo mediante la metodología descrita anteriormente; y las relaciones entre los índices de sequía

SDI, Ie con las variables hidrológicas de la cuenca, para años húmedos, normales y secos; se muestran en el Capítulo 3.

## **USO DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA)**

Debido a la importancia de las Redes Neuronales Artificiales (RNA) en el desarrollo de este trabajo, en la sección Estado del arte de redes neuronales se hace una breve descripción en cuanto a definición, conceptos fundamentales, funcionamiento, arquitectura, procesos de aprendizaje (entrenamiento y validación), factibilidad de aplicación y ejemplos (casos) de aplicación; en esta sección se hace hincapié en cómo se aplican a los datos meteorológicos, hidrológicos e índices de sequías y al pronóstico de sequías meteorológicas e hidrológicas en las diferentes cuencas del Organismo de Cuenca Pacífico Norte. Ver Anexo 1.

No obstante conviene matizar la palabra Aplicaciones y diferenciar entre aplicaciones candidatas, aplicaciones en desarrollo y aplicaciones ya demostradas. Dicho de otro modo, es necesario puntualizar el estado de desarrollo, de realización y de comprobación de las redes neuronales utilizadas en cada aplicación. Las aplicaciones candidatas son aquellos problemas que en principio podrían ser resueltos con este tipo de tecnología que ofrecen las redes neuronales artificiales. Las aplicaciones en desarrollo son aquellas en las que se han realizado los estudios oportunos del problema y se dispone de un prototipo de red al que se le ha entrenado para resolver una versión simplificada del problema. Por último, las aplicaciones demostradas son redes que de hecho ya están siendo utilizadas para resolver un problema concreto (Basogain, 2009).

## **DISEÑO DE UNA RED NEURONAL**

Para el diseño de la red neuronal destinada a resolver un problema concreto es conveniente disponer de programa de computación para el diseño de RNA. Con un programa disponible de este tipo basta con pensar en términos de redes y no en programación de algoritmos utilizando lenguajes de alto nivel. De esta manera todo el

esfuerzo se debe dirigir al diseño de la arquitectura o estructura de la red y en la selección de los datos del conjunto de entrenamiento y de prueba (Basogain, 2009).

Sobre la base de lo anterior, con el programa Neurosolution.xlsx se construyó la red para el pronóstico de sequías meteorológicas (Ravelo *et al.*, 2014) y con Neurosolutions.exe la red para el pronóstico de sequías hidrológicas, motivo de este trabajo de investigación; especificando el número de capas, de neuronas y los tipos de conexiones; definiendo los ficheros o conjuntos de datos de entrada y salida; eligiendo los parámetros de los cálculos internos de la red, seleccionando las diferentes funciones de transferencia y procesamiento de las neuronas, así como construyendo variaciones de los modelos estándar. La elección de la arquitectura, selección y pre-procesado de los datos presentados a la red, es uno de los factores más influyentes en el éxito del diseño y realización de una red para una aplicación.

## **FASES DE LA APLICACIÓN DE UNA RNA**

Las fases más importantes en la aplicación de los modelos de redes neuronales, como se menciona anteriormente, son: entrenamiento, prueba, validación, extensión o pronóstico (predicción) y evaluación de resultados (Bocco *et al.*, 2013) la selección de la RNA depende si se va a predecir, asociar o clasificar; en este caso el tema es la predicción de índices de sequía meteorológica e hidrológica.

En la fase de entrenamiento se debe especificar el número de iteraciones y la planificación de los cambios de los parámetros de aprendizaje. Generalmente, esta fase requiere varias sesiones y la experimentación de diferentes parámetros de aprendizaje, diferentes vectores de entrada o diversas estrategias de entrenamiento que permiten obtener conclusiones definitivas para la solución más eficaz de una aplicación. El entrenamiento de la RNA para predicción son del tipo Supervisado (Basogain, 2009).

Entre los principales trabajos que han aportado al entendimiento, comprensión y aplicaciones de predicción, están los desarrollados por Basogain (1998 y 2009) quién

describe las principales RNA para pronóstico: Adaline y Madaline (1960), Digital Neural Network Architecture (DNNA) Networks (1990), Perceptron (1950), Back-Propagation (1985), Self Organizing Map (S.O.M.) (Kohonen, 1988; Smith, 2003). Se describen los principales algoritmos y arquitecturas de redes neuronales, entre ellas: El Perceptron Simple, la Back-Propagated Delta Rule Networks (BP) y Radial Basis function Networks (RBF) Kim *et al.*, 2012), quienes aplican la red Multilayered Feed Forward Neural Network, basado su entrenamiento en la “backpropagation”, utilizada para el pronóstico de series de tiempo hidrológicas. Bocco *et al.* (2007) clasifican datos de cobertura de suelo a partir de información proveniente de imágenes satelitales, aplicando los modelos de Redes Neuronales Perceptron Multicapa feed-forward. Bocco *et al.* (2012) desarrollan modelos de RNA para estimar la evolución temporal de fracción de cobertura de soja desde imágenes MODIS y Landsat, con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) igual a 0,90 y 0,91, respectivamente. En la Figura 2.7, se muestra el diagrama de la estructura de RNA utilizada para el pronóstico de sequías hidrológicas en las principales corrientes y presas del OCPN.

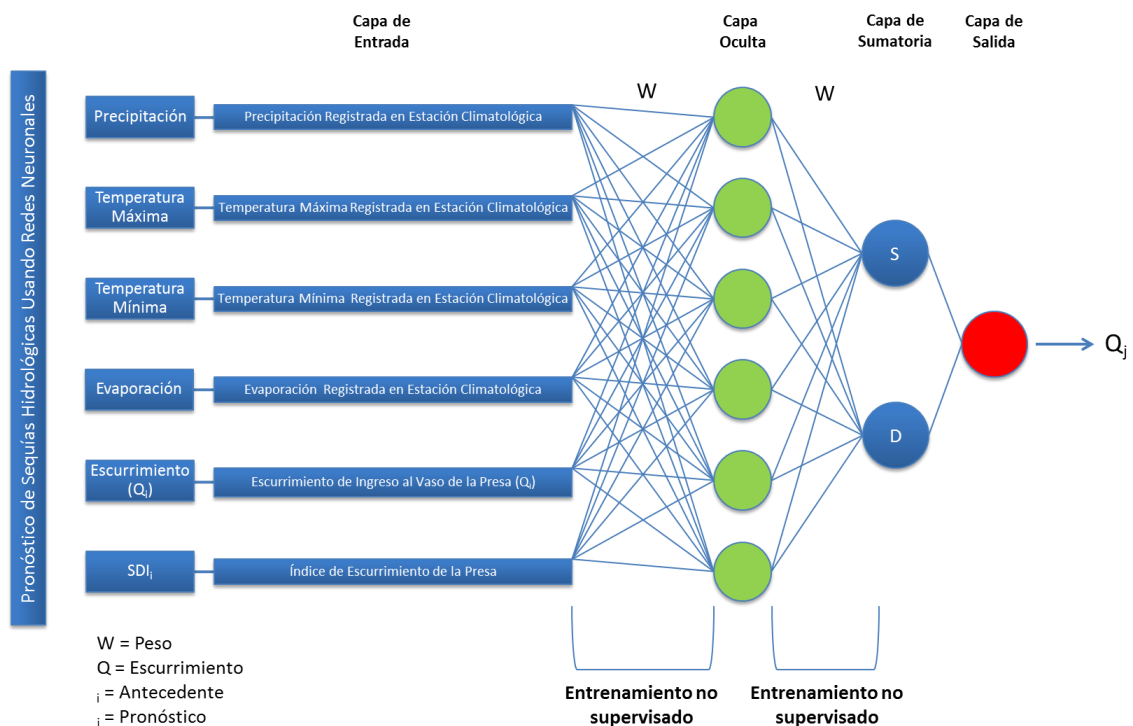


Figura 2.7. Estructura de RNA utilizada para el pronóstico de sequías hidrológicas usando.

## **PRONÓSTICO DE SEQUÍAS METEOROLÓGICAS E HIDROLÓGICAS**

Para el monitoreo de las fases de la sequía y para efectos de planeación, elaboración de planes de mitigación e implementación de programas de mitigación de sequías, se hace necesario elaborar escenarios probables de ocurrencia de sequías; para ello se aplican los programas de redes neuronales (Neurosolution, 2009), los cuales son métodos no paramétricos que trabajan a partir de una serie histórica de índices de sequía y datos hidroclimatológicos, con los cuales se entrena, aprende y se calibra, para posteriormente inferir los índices a 1, 2 o 3 meses siguientes (Ravelo, 2008 y 2009; Douriet, 2010; Ravelo *et al.*, 2014).

### **PRONOSTICO DE SEQUÍAS METEOROLÓGICAS (RNA UNIVARIADAS)**

En esta sección se describe la metodología para determinar escenarios de sequías meteorológicas a 1, 2 y 3 meses en el OCPN, mediante el análisis univariado temporal (pronóstico de índices de sequía) usando redes neuronales (Douriet, 2010; Ravelo, 2009, 2010, 2011 y 2012).

- **Aplicación del programa Neurosolutions a los índices de sequía**

Para la aplicación del pronóstico de sequías meteorológicas, mediante el programa Neurosolutions.xlsx, se utilizó la metodología propuesta durante el desarrollo del Proyecto de Sequías en el OCPN (Ravelo, 2007; Ravelo *et al.*, 2014).

Los datos utilizados son los índices mensuales de sequía (SPI, PDSI) para cada una de las 49 estaciones meteorológicas, estimados durante el monitoreo de sequías meteorológicas, para el período 1978-2015. Debido a que el pronóstico fue realizado con el uso de redes neuronales (Kim *et al.*, 2002; Ravelo, 2007) utilizando una sola variable de

entrada y obteniendo una sola variable de salida, se tiene un pronóstico univariado de sequías meteorológicas, de entrenamiento supervisado.

Los pasos más importantes para la aplicación de las RNA en el pronóstico de sequías (mediante el programa Neurosolutions\_4) fueron:

- a) Desarrollar el archivo con los índices de sequía estimados para el monitoreo, en formato de Excel, que servirán de insumo al programa Neurosolutions for Excel
- b) Efectuar corridas de entrenamiento, prueba y validación, de acuerdo a las indicaciones del manual.
- c) Crear una nueva red neuronal (o abrir una existente) eligiendo el tipo de red (en este caso Multilayer perceptron, con 6 neuronas de entrada – son seis meses previos-, una capa oculta con cuatro neuronas y una capa de salida con una neurona – el índice a estimar).
- d) Guardar en archivo de computadora la red generada.
- e) Ejecutar el entrenamiento de la red.
- f) Llevar a cabo la validación (testing).

Posteriormente, para cada una de las series de índices pronosticados, se realizó una evaluación del pronóstico de la sequía meteorológica mediante métodos estadísticos (Balzarini, 2011) y el uso de los Programas InfoStat ([www.infostat.com.ar](http://www.infostat.com.ar)) y Errores.xlsx (CREAN, 2015), determinando su grado de ajuste o de error (Dawson, 2001).

- **Análisis temporal y espacial del pronóstico de los índices de sequía**

Los resultados del pronóstico de los índices de sequía (SPI y PDSI) se utilizaron para la determinación de escenarios temporales y espaciales de sequías meteorológicas.

## **1) SPI temporal y espacial a diferentes escalas de tiempo**

Para cada una de las estaciones meteorológicas se consideró la serie de índices SPI a diferentes escalas de tiempo y se aplicó el programa Neurosolution.xlsx a cada red neuronal, se obtuvieron los pronósticos de los índices SPI a diferentes escalas de tiempo, formando con ellos una nueva serie de índices estimados a uno, dos y tres meses siguientes, evaluándolos mediante diferentes métodos estadísticos, principalmente el error estándar de estimación.

Para el análisis temporal y espacial de la sequía se graficaron los índices de la serie histórica y los pronosticados, con respecto al tiempo; clasificándolos en la fase de la sequía conforme a la clasificación y paleta de colores propuesta en la sección indicadores normativos de las fases de la sequía. Se seleccionaron los años con sequía, normales y húmedos; para el caso de los meses del período de sequía se elaboraron para cada mes, mapas para el análisis espacial de la sequía, mediante el Sistema Operativo de Sequías (SOS), el cual utiliza el método de interpolación de Kriging. Además, se elaboran los mapas del índice de Diferencia de Vegetación (NDVI) para los meses con sequía seleccionados y se comparan entre sí (SPI vs NDVI) para un mejor análisis del pronóstico de la sequía espacial.

## **2) PDSI temporal y espacial**

De manera similar a lo realizado en el análisis del índice de sequías SPI pronosticados, se llevó a cabo el análisis temporal y espacial de los índices de sequía PDSI obtenidos de los pronósticos para cada una de las estaciones meteorológicas del OCPN.



## **PRONÓSTICO DE SEQUÍAS HIDROLÓGICAS (REDES NEURONALES MULTIVARIADAS)**

En esta sección se desarrolla el pronóstico de sequías hidrológicas, en dos etapas; la primera de ellas, consiste en desarrollar una metodología para el análisis multivariado temporal y pronóstico de sequías hidrológicas, mediante el uso de redes neuronales, variables meteorológicas, volúmenes de escurrimiento e índices de sequía hidrológica (SDI). La segunda etapa consiste en aplicar la metodología propuesta en el pronóstico de los volúmenes de escurrimiento y de ingreso a las presas (Q) y los índices de sequía hidrológica (SDI, Ie) a 1, 2 y 3 meses posteriores, para las principales corrientes y presas existentes en el OCPN.

## **APLICACIÓN DE LAS RNA EN EL PRONÓSTICO DE SEQUÍAS HIDROLÓGICAS**

El análisis multivariado del comportamiento histórico de los escurrimientos mensuales de los ingresos a los embalses se realizó considerando su variabilidad temporal, así como las variables de precipitación, evaporación potencial y temperaturas medias, máximas y mínimas registradas en las estaciones meteorológicas con influencia en la cuenca de aportación al vaso de las presas. El período considerado para el análisis dependió de su nivel de información; haciendo diferentes combinaciones de las variables. Para cada caso en particular se llevó a cabo el análisis de componentes principales mediante Programa InfoStat, determinando el grado de influencia de dichas variables en la determinación del volumen de ingreso mensual a los embalses; así como su grado de dispersión y de ajuste de curvas a los datos.

A título de ejemplo se describe la aplicación de las RNA en el pronóstico de sequías hidrológicas al Sistema Hidráulico del Río Culiacán; el cual está compuesto por los Subsistemas : Cuenca del río Humaya y Cuenca del río Tamazula; en el caso del primer subsistema, río Humaya, desde donde nace hasta la presa Adolfo López Mateos (El Varejonal), los datos utilizados son los escurrimientos y climatológicos mensuales

registrados en la presa El Varejonal y los climatológicos de las estaciones Vascogil, La Huerta, Badiraguato y Guatenipa, para el período 1970-2015; en los referente al segundo subsistema, río Tamazula, desde donde nace hasta la presa Sanalona, los datos utilizados son los escurrimientos y climatológicos mensuales registrados en la presa Sanalona y los climatológicos de las estaciones Vascogil, Tamazula y La Huerta, para el período 1970-2015, entre los datos más importantes están la precipitación, temperaturas y evaporación potencial (CONAGUA, 2016).

El pronóstico de sequías hidrológicas se lleva a cabo mediante los enfoques: Univariado y Multivariado temporal; el pronóstico Univariado de las sequías hidrológicas fue realizado con el uso de redes neuronales (Kim *et al.*, 2002; Ravelo, 2008) y el índice SDI, como una sola variable de entrada y una de salida. En cambio, el pronóstico multivariado temporal se llevó a cabo considerando como neuronas de ingreso a las variables climatológicas, volúmenes de escurrimiento y el índice de escurrimiento, considerando como variable de salida a los volúmenes de escurrimiento (Q).

Se evalúa el pronóstico de la sequía hidrológica mediante métodos estadísticos de igual manera que las sequías meteorológicas.

### **1) SDI**

En el caso del pronóstico del índice de escurrimiento (SDI) mediante RNA, se lleva a cabo mediante los enfoques univariado y multivariado; en el primer enfoque, con base en los registros históricos de escurrimiento Q, se estiman los índices de escurrimiento SDI usando las RNA univariadas (programa SDI.xlsx) y de manera similar al pronóstico de los índices SPI, usando la red neuronal Perceptron Multicapa, se determinan los índices de sequía SDI de los siguientes tres meses. En cambio, para la determinación del índice SDI, con el enfoque multivariado, primero se pronostican los volúmenes de escurrimiento o de ingreso a los embalses de las presas, mediante la metodología descrita en la sección anterior y aplicada en la siguiente sección; y posteriormente, se estiman los índices SDI para los siguientes tres meses.

## 2) Q (Volúmenes de escurrimiento mensual)

El pronóstico de los volúmenes de escurrimiento en cauces y de ingreso mensuales a las presas, se estimó mediante la aplicación de diferentes modelos (Multilayer Perceptron, Generalized Feed Forward, Modular Neural Network, Jordan/Elman Network y Principal Component Analysis) y estructuras de Redes Neuronales. Se consideraron diferentes funciones de transferencia (TanhAxon, SigmoidAxon, Linear TanhAxon) y Learning Rule (Step, Momentum, Conjugate Gradiente), y diferentes porcentajes de datos para su validación y entrenamiento, aplicando para ello el programa de Redes Neuronales NeuroSolutions (www.neurosolutions.com).

El diagrama de flujo de la metodología general desarrollada para este trabajo se ilustra en la Figura 2.8.

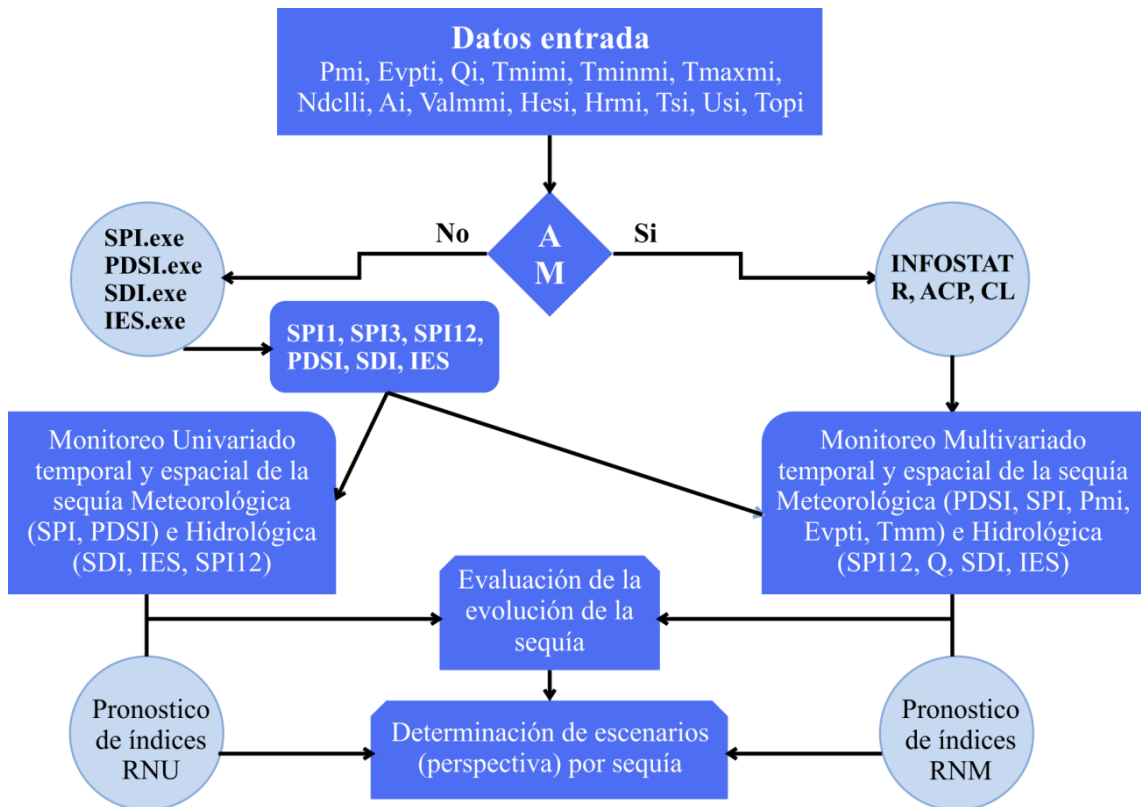


Figura 2.8. Esquema descriptivo de la metodología general empleada para el pronóstico de sequías hidrológicas utilizando redes neuronales en el OCPN.

Esta metodología se aplicó a las principales cuencas del OCPN: Río Fuerte, Río Sinaloa, Río Mocorito, Río Culiacán, Río San Lorenzo y, Río Elota. Los resultados de estos trabajos y su discusión se muestran en el Capítulo 3.

## **REPRESENTACIÓN GRÁFICA TEMPORAL Y ESPACIAL DE LA SEQUÍA**

En la representación gráfica temporal y espacial de la sequía se utilizaron datos de precipitación histórica de 49 estaciones climatológicas y de escurrimiento mensual de 16 estaciones hidrométricas; así como, los índices de sequía meteorológica SPI y PDSI, y los índices de sequía hidrológica SDI e Ie. La información se presenta mediante tablas, graficas, mapas y matrices, indicando en cada caso la categoría de sus fases de sequía e ilustrado mediante las paletas de colores, respectivas.

### **Representación gráfica temporal de la sequía**

Para el análisis temporal de la sequía, se elaboraron gráficas históricas del comportamiento de las variables de precipitación (P vs T), escurrimientos (Q vs T) y de los índices meteorológicos PDSI (PDSI vs T), SPI a diferentes escalas de tiempo (SPI1 vs T, SPI3 vs T, SPI6 vs T y, SPI12 vs T) e hidrológicos (SDI vs T, Ie vs T). Además, para una mejor visualización se tabularon los índices históricos en matrices, en donde las columnas indican los meses y las filas los años; la fase de la sequía a donde clasifica cada índice estimado se ilustra mediante el color que le corresponde en la paleta de colores seleccionada para cada índice.

### **Representación gráfica espacial de la sequía**

Para el análisis espacial de la sequía, se elaboraron mapas de los índices SPI y PDSI mensuales, para un mes y año seleccionado; partiendo de sus valores puntuales e interpolados mediante el método de Kriging. Para ello, se utilizó el Sistema Operativo de

Sequías (SOS), que los genera en forma automatizada. Para ilustrar la fase de la sequía que corresponde a cada índice estimado, se utilizó la paleta de colores correspondiente.

El Índice Normalizado de la Diferencia de Vegetación (NDVI), estimado mediante el programa IDRISI utilizando imágenes satelitales MODIS, tiene una representación espacial por mes. La variabilidad espacial de este índice por píxeles, está representado por los colores correspondientes a su clasificación y paletas de colores, definidos en el punto Indicadores normativos de las fases de la sequía.

Para el caso particular de un píxel, conjunto de píxeles o zonas, se grafican los valores históricos del NDVI, formando un histograma de la variación histórica del NDVI con respecto al tiempo.

## **ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LA SEQUÍA**

La evaluación consistió en analizar en el OCPN, a escala de cuenca, ámbito de consejos de cuenca y municipio la vulnerabilidad económica, social, ambiental y global según la metodología propuesta por el IMTA (Ortega *et al.*, 2015; Torrecillas *et al.*, 2015).

El análisis de las cuatro vulnerabilidades establecidas por la metodología fue llevada a cabo considerando los lineamientos del manual para el cálculo de índices de vulnerabilidad ante la sequía en México. Se utilizaron las planillas (Excel) que presenta los valores de los 24 indicadores y el procesamiento correspondiente. Se analizan, a título ilustrativo, algunos municipios que poseen alta o baja vulnerabilidad en alguna de las cuatro clases y se identifican a los indicadores correspondientes del nivel de vulnerabilidad.

Se estimaron los índices de vulnerabilidad ante la sequía y se elaboraron los mapas correspondientes (vulnerabilidad económica, social, ambiental y global), con base en la plataforma creada para este fin, durante los trabajos del Programa de Medidas Preventivas

y de Mitigación de Sequías para los Consejos de Cuenca del OCPN para el año 2015 (Torrecillas *et al.*, 2015); los indicadores considerados, fueron:

- Densidad de población (habitantes/km<sup>2</sup>)
- Población económicamente activa desocupada (%)
- Población sin derecho a servicios de salud (%)
- Población en condiciones de pobreza (%)
- Población analfabeta (%)
- Grado de explotación de los acuíferos (adimensional)
- Grado de explotación de las cuencas (adimensional)
- Valor de la producción agrícola (\$)
- Valor de la producción de ganado en pie (\$)
- Viviendas sin drenaje ni excusado (%)
- Viviendas sin energía eléctrica (%)
- Viviendas sin agua entubada (%)
- Viviendas con piso de tierra (%)
- Deforestación (ha)
- Superficie afectada por incendios forestales (ha)
- Superficie rehabilitada para riego (ha)
- Superficie agrícola tecnificada (ha)
- Longitud de caminos rurales (km)
- Ingreso per cápita anual
- Beneficiarios del programa Oportunidades
- Beneficiarios del programa Liconsa
- Años promedio de escolaridad
- Superficie reforestada (ha)
- Áreas Naturales Protegidas (%)

Los índices de vulnerabilidad de sequía en la RHA Pacífico Norte son indicadores relativos a escala municipal que sirven para identificar y proponer acciones en los PMPMS para disminuir la vulnerabilidad tomando en cuenta los índices económicos, sociales y ambientales al igual que los factores identificados por medio de la metodología de la

planeación estratégica para el desarrollo de los proyectos prioritarios en los Consejos de Cuenca y municipios.

Las escalas de vulnerabilidad utilizadas, fueron Muy Alta, Alta, Media, Baja y Muy Baja, conforme a la clasificación y paletas de colores definidos en la sección Indicadores normativos de las fases de la sequía.

#### **a) Estimación de la Vulnerabilidad Económica**

La determinación de los niveles de vulnerabilidad económica para los distintos municipios se basa en el uso de diversos indicadores de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación. A esos indicadores se les aplica distintos pesos para indicar sus efectos sobre la vulnerabilidad. Los valores de los indicadores influyen sobre la vulnerabilidad final. Los indicadores más importantes fueron: densidad de población, población económicamente activa desocupada, explotación de los acuíferos, uso ganadero y agrícola.

#### **b) Estimación de la Vulnerabilidad Social**

Los indicadores de vulnerabilidad social determinan diferentes niveles que dependen del valor del peso asignado en la fórmula utilizada en su estimación. Los indicadores de mayor influencia en la vulnerabilidad son: población en condiciones de pobreza, ingreso per cápita, beneficiarios del Programa de Abasto Social de Leche LICONSA, porcentaje de viviendas sin agua entubada

#### **c) Estimación de la Vulnerabilidad Ambiental**

Los indicadores de vulnerabilidad ambiental que tienen mayor efecto son: el grado de explotación de los acuíferos y la deforestación con sus respectivos pesos. Existen otras variables que afectan de forma notable al medio ambiente, pero que no se han considerado en la metodología de estimación propuesta, entre las más importantes está el Índice de la Calidad del Agua (ICA) en el agua superficial y subterránea.

#### **d) Estimación de la Vulnerabilidad Global**

La vulnerabilidad global ha sido determinada como resultado del producto equivalente de las vulnerabilidades económica, social y ambiental.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la estimación y evaluación de la vulnerabilidad a la sequía en el OCPN, utilizando la metodología del IMTA, en los PMPMS de los Consejos de Cuenca del OCPN (Torrecillas *et al.*, 2015), se detectó que el sistema de evaluación de la vulnerabilidad económica, social, ambiental y global posee áreas de fortalezas y otras de debilidades que deben ser mejoradas.

Por ejemplos, la variable viviendas sin drenaje o excusados, con piso de tierra debe ser excluida ya que no es relevante; de las variables ingreso per cápita o pobreza y analfabetismo o escolaridad, son opuestas por lo que es suficiente considerar una de ellas. Para el caso de la estimación del índice de vulnerabilidad ambiental incluir como un indicador de peso al Índice de la calidad del agua (ICA) superficial y subterránea; Además, se requiere validar los pesos asignados para las distintas condiciones socioeconómicas o ambientales por municipio y aplicar la distribución probabilística, solamente a términos o variables aleatorias.

La vulnerabilidad global como producto de las vulnerabilidades equivalentes de los aspectos económicos, sociales y ambientales parecería no ser la forma más apropiada para su estimación, ya que es evidente que tienen mayor peso las vulnerabilidades económicas y sociales que las ambientales frente a la amenaza de las sequías; por lo que el peso correcto de cada vulnerabilidad para la determinación de la vulnerabilidad global es motivo de investigaciones y validaciones experimentales futuras.

En consecuencia, es importante la revisión y ajuste de la metodología utilizada para determinar las distintas vulnerabilidades de forma de lograr el mejor acercamiento con la realidad. Los conocimientos de la realidad por los grupos sociales y expertos locales, constituye una importante fuente de información para la determinación de los valores



correctos de las vulnerabilidades a través de una selección apropiada de los indicadores, la ponderación correcta de cada indicador y vulnerabilidad para establecer la vulnerabilidad global (Torrecillas *et al.*, 2015).

## **DETERMINACIÓN DE ESCENARIOS POR SEQUÍA**

En esta sección se describe la metodología para la Determinación de Escenarios por sequía mediante la aplicación del análisis multivariado temporal usando redes neuronales (en el ámbito del OCPN, México), la cual está compuesta de las etapas siguientes:

- Delimitación del Sistema Hídrico en estudio
- Descripción del Sistema Hídrico
- Elaboración del modelo conceptual de funcionamiento hídrico ante la sequía
- Monitoreo temporal y espacial de la sequía meteorológica
- Monitoreo temporal de la sequía hidrológica
- Pronóstico de las sequías meteorológicas
- Pronóstico de las sequías hidrológicas
- Estimación de los índices de vulnerabilidad
- Determinación de escenarios de sequía para diferentes condiciones de clima

### **Delimitación del Sistema Hídrico en Estudio**

La RHAIII Pacífico Norte, contiene numerosos sistemas hídricos importantes, entre ellos: Sistema Río Fuerte, Sistema Río Sinaloa, Sistema Río Mocorito, Sistema Río Culiacán, Sistema Río San Lorenzo, Sistema Río Elota y Sistema Río San Pedro. Como ejemplo de aplicación se trabajara con el Sistema Río Culiacán.

## **Descripción del Sistema Hídrico**

La zona de estudio, cuenca y acuífero del Río Culiacán, se localiza en el noroeste de la República Mexicana; en la jurisdicción del OCPN, dentro de la cuenca hidrográfica y la unidad hidrogeológica del mismo nombre. Limita hacia el norte con la cuenca y acuífero del río Mocorito, hacia el sur con el acuífero y cuenca del río San Lorenzo, al oeste el Océano Pacífico y al este con el Organismo de Cuenca Cuencas Centrales del norte; es conveniente mencionar que la zona de explotación del acuífero se encuentra en la parte baja de la cuenca, dentro del valle costero del río Culiacán y la parte alta de la cuenca es la zona de recarga del acuífero (Figura 2.9).

La cuenca del Río Culiacán, nace en el estado de Durango y termina en el Golfo de California, es de gran desarrollo y está conformada por los ríos Humaya, Tamazula y Culiacán; este último se forma con la confluencia de los dos primeros ríos. También cuenta con dos presas “El Varejonal” y “Sanalona”, sobre los ríos Humaya y Tamazula, respectivamente. El acuífero Río Culiacán, se forma en ambas márgenes del río del mismo nombre, a partir de la ciudad de Culiacán, Sinaloa, donde se inicia el valle y el Distrito de Riego 010, terminando en la línea de costa; este acuífero es de tipo libre, con niveles estáticos someros, que en general son menores a los 10 metros de profundidad.

Por otra parte debido al fuerte desarrollo agrícola de la zona, se interconecta con los sistemas de riego del río San Lorenzo, en el sur, y con el correspondiente al río Mocorito, en el norte; del río San Lorenzo se importan 261 hm<sup>3</sup> al año y de la presa “El Varejonal” se exportan 221 hm<sup>3</sup> anuales; todos estos volúmenes de agua son destinados al uso agrícola en los Distritos de riego 010 y 074 respectivamente.

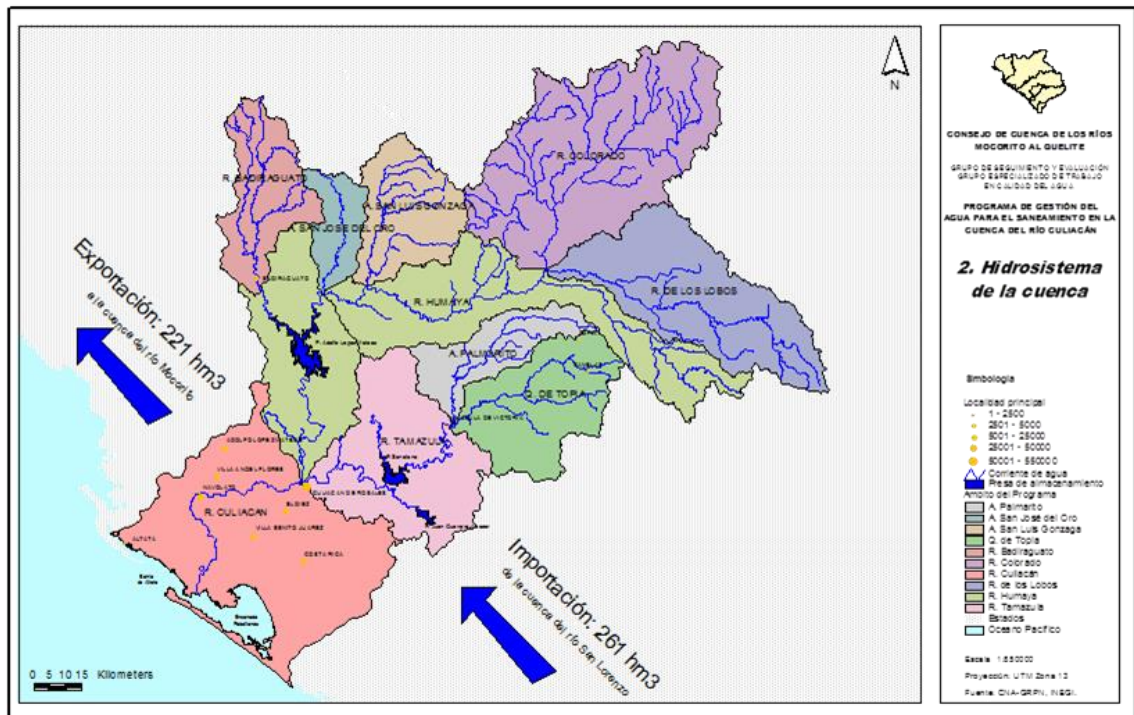


Figura 2.9. Sistema Hídrico Río Culiacán (Cuenca y acuífero del Río Culiacán); adaptado de (Douriet, 2010).

### Elaboración del modelo conceptual de funcionamiento hídrico ante la sequía

Las sequías son fenómenos inevitables, impredecibles, sin epicentro, ni dirección definida, de gran extensión y, eventualmente, se presentan en cualquier lugar y en cualquier tiempo (Velasco, 2002; Ravelo, 2007; Douriet, 2010). Por ello, para caracterizar y evaluar el efecto de las sequías en el Sistema Hídrico del Río Culiacán, fue necesario analizar toda la cuenca hidrológica y la unidad hidrogeológica del Río Culiacán, ya que están interconectadas entre sí. Considerando que con la sequía se reduce la precipitación, disminuyendo el escurrimiento superficial y por tanto la captación de agua en las presas; así como también con el incremento en la evapotranspiración se genera déficit de agua en los suelos, produciéndose daños por estrés hídrico en los cultivos, con los consecuentes impactos económicos, sociales y ambientales (Figura 1.1).

Para establecer el modelo conceptual de funcionamiento hídrico ante la sequía en el Sistema Hídrico del Río Culiacán, se consideró la definición de sequía adoptada en el capítulo anterior.

En el área en estudio, se distinguen tres zonas de distinto impacto de sequía:

La primera (zona A) comprende desde las presas El Varejonal (sobre el río Humaya), y Sanalona (sobre el río Tamazula), hacia aguas arriba, hasta los límites con el parteaguas de la cuenca; en donde su disponibilidad de agua superficial solamente depende de las precipitaciones y escurrimientos de los ríos, los cuales hasta aquí se consideran vírgenes; en un análisis de los registros históricos de precipitaciones y escurrimientos se muestra que son de régimen variable y estacional, en donde se manifiestan períodos húmedos con grandes avenidas y de sequías prolongadas, en donde los períodos de estiaje se agudizan.

La segunda (zona B) comprende desde las presas, antes mencionadas, hasta la presa derivadora Antonio Carvajal Zarazúa, a la altura de la ciudad de Culiacán. En este tramo el agua que se conduce por los ríos es controlada y su régimen depende de los volúmenes de agua que se extraen para riego agrícola, los cuales son más o menos constantes, quedando solamente la precipitación como variable no controlada; y

La tercera (zona C), donde el río Culiacán transporta un caudal casi nulo con aportes únicamente de los escapes de las compuertas, los aportes del subálveo y las descargas de aguas negras de la ciudad de Culiacán y de poblados ribereños; en cambio, se cuenta con las aguas subterráneas del acuífero del río Culiacán y con las aguas de retorno agrícola del Distrito de Riego 010, provenientes tanto de aguas superficiales como de aguas subterráneas.

El impacto por sequía tiende a ser mayor en la zona A, debido a que cuando se presenta el fenómeno, la disponibilidad de agua disminuye hasta generar déficit para los diferentes usos, y las condiciones para compensarlo son escasas. Sus efectos se vuelven más severos en cuanto su duración e intensidad sean mayores, pudiendo llegar a situaciones críticas y catastróficas; aquí se manifiesta de manera inmediata la sequía meteorológica, para luego dar paso a la tipo agrícola y posteriormente a la hidrológica.

En cambio, en la zona B la sequía hidrológica se amortigua con los volúmenes de agua que escurren de manera controlada por los ríos Humaya y Tamazula, pero cuanto más lejos de los cauces, los efectos por sequía se acentúan.

En la zona C, tanto la sequía meteorológica como la agrícola se presentan, pero al igual que la agrícola son atenuadas por los volúmenes de agua superficial aportados por las presas y por la extracción de agua subterránea. Solamente si la sequía hidrológica de la zona A llega a fase fuerte o extrema se podría tener algún impacto por sequía en esta zona.

Por lo anteriormente descrito, es de esperar que el impacto directo de la sequía en el acuífero del Río Culiacán sea leve, y solamente de manera indirecta podrá tener serias repercusiones, si el grado de sequía hidrológica de la zona A es tan crítica, que para compensar un fuerte déficit de aguas superficiales sea necesario extraer más allá de la capacidad de recarga del acuífero. Lo que sí es conveniente saber es de cuánto y de qué parte hay que extraer los volúmenes de aguas subterráneas sin que genere impactos negativos en el acuífero como son abatimiento de niveles al grado de sobre-explotación y el incremento del riesgo de intrusión salina en las partes bajas del acuífero.

### **Monitoreo temporal y espacial de la sequía meteorológica**

El monitoreo temporal y espacial de la sequía meteorológica, se llevó a cabo conforme a los métodos indicados en el punto 2.2.1, para todo el OCPN, considerando las normales climatológicas anuales y mensuales, principalmente la de la precipitación, estimando los índices SPI y PDSI, mediante el SOS; y estimando el NDVI, mediante el IDRISI Taiga; para todo el OCPN y filtrando los resultados temporales y espaciales para el Sistema Hídrico Río Culiacán.

Con los resultados de la estimación de los índices SPI y PDSI se forman matrices por meses y años, y gráficas de la variabilidad de los índices con respecto al tiempo, indicando conforme a su clasificación y paleta de colores la fase de sequía que le corresponde de acuerdo al método del índice utilizado. Se clasifica el mes y año de interés para determinar

si el año fue seco, normal o húmedo. En todos los casos seleccionados se determinan los mapas espaciales de los índices para observar de mejor manera la variabilidad espacial de la sequía. Como apoyo a la determinación de la variabilidad espacial de la sequía se determinaron los mapas de NDVI mensual, para el mes o período elegido.

### **Monitoreo temporal de la sequía hidrológica**

El monitoreo temporal y espacial de la sequía hidrológica, se llevó a cabo conforme a los métodos indicados en el punto Monitoreo temporal y espacial de sequías, para las principales corrientes y presas del OCPN, considerando las normales de escurrimiento anual y mensual, estimando los índices SDI y Ie, mediante los programas de Excel SDI.xlsx y Ie.xlsx; y comparando con los resultados obtenidos con el índice estandarizado de precipitación para 12 meses (SPI12), estimado en el punto anterior. Las corrientes consideradas son el río Humaya y el río Tamazula; las hidrométricas Varejonal y Sanalona; y las presas Adolfo López Mateos y Sanalona.

Con los resultados de la estimación de los índices SDI y Ie se forman matrices por meses y años, y gráficas de la variabilidad de los índices con respecto al tiempo, indicando conforme a su clasificación y paleta de colores la fase de sequía que le corresponde de acuerdo al método. Cada mes en particular se clasifica como seco, normal o húmedo, o si las presas se encuentran en estado normal, prealerta, alerta o emergencia. En todos los casos seleccionados se relacionan con los mapas espaciales del SPI a diferentes escalas de tiempo, principalmente el SPI12.

### **Pronóstico de las sequías meteorológicas**

El pronóstico de sequías meteorológicas, se llevó a cabo conforme a los métodos indicados en el punto Pronóstico de sequías meteorológicas; para todo el OCPN, considerando como datos de entrada los índices SPI y PDSI, estimados mediante el SOS; y filtrando los resultados temporales y espaciales para el Sistema Hídrico Río Culiacán.

Con los resultados del pronóstico de los índices SPI y PDSI, para los siguientes tres meses, se complementan las matrices generadas por los índices históricos, y se elaboran gráficas del pronóstico de los índices con respecto al tiempo, indicando conforme a su clasificación y paleta de colores la fase de sequía que se tendría de acuerdo al método. Se analizan los resultados de los índices indicando si el año fue seco, normal o húmedo. Para todos los meses de pronóstico se elaboran mapas de los índices para observar de mejor manera la variabilidad espacial de la sequía.

### **Pronóstico de las sequías hidrológicas**

El pronóstico de las sequías hidrológicas, se llevó a cabo conforme al método propuesto para el pronóstico de sequías hidrológicas en las principales corrientes y presas del OCPN. El caso particular del Sistema Hídrico del Río Culiacán, está compuesto por los subsistemas hídricos Río Humaya y Río Tamazula.

Para el primer subsistema se consideraron los registros históricos de las variables de precipitación, temperaturas y evaporación de las estaciones climatológicas Badiraguato, Guatenipa, Varejonal, La Huerta y Vascogil; los registros históricos de escurrimiento mensual de las tres primeras estaciones que también son hidrométricas y los registros históricos de ingreso y el volumen de almacenamiento al primer día de cada mes en el vaso de la presa Varejonal.

En el caso del segundo subsistema se consideraron los registros históricos de las variables de precipitación, temperaturas y evaporación de las estaciones climatológicas Badiraguato, Guatenipa, Sanalona, Tamazula y Vascogil; los registros históricos de escurrimiento mensual de las cuatro primeras estaciones que también son hidrométricas y los registros históricos de ingreso y el volumen de almacenamiento al primer día de cada mes en el vaso de la presa Sanalona.

Con los datos de las variables climatológicas, hidrométricas y de almacenamiento, mediante el uso de las redes neuronales se pronosticaron los volúmenes de ingreso al vaso

de las presas Varejonal y Sanalona, para los siguientes tres meses. Se estimaron los índices SDI y  $I_e$ , respectivos, mediante los programas de Excel SDI.xlsx y  $I_e$ .xlsx; y se comparan con los resultados obtenidos con el índice estandarizado de precipitación para 12 meses (SPI12), estimado en el punto anterior.

Con los resultados del pronóstico de los escurrimientos de los siguientes tres meses, se estiman los índices SDI y  $I_e$ , completando las matrices formadas durante el monitoreo, y se grafican los índices con respecto al tiempo, indicando conforme a su clasificación y paleta de colores la fase de sequía que le corresponde de acuerdo al método. Se analiza si los meses serán secos, normales o húmedos, o si las presas se encontraran en estado normal, prealerta, alerta o emergencia. En todos los casos seleccionados se relacionan con los mapas espaciales del SPI a diferentes escalas de tiempo, principalmente el SPI12.

### **Estimación de los índices de vulnerabilidad**

La estimación de la vulnerabilidad a la sequía por cuencas, consejos de cuenca y municipios del OCPN, se llevó a cabo conforme a la metodología propuesta en el punto Estimación de la vulnerabilidad a la sequía; para el caso particular del Sistema Hídrico del Río Culiacán, se filtran los resultados de la estimación de la vulnerabilidad para la cuenca del río Culiacán y los municipios que la componen dentro del Consejo de Cuenca de los ríos Mocarito al Quélite.

La construcción de obra hidráulica para almacenar o abastecer de agua a la población, irrigar tierras o para usos ganadero del Sistema hídrico del río Culiacán permite aumentar mitigar los efectos y aumentar la resiliencia al evento de sequía; por lo que se verá reflejado en la estimación de los índices.

Para la estimación de la vulnerabilidad a la sequía se utilizó el programa de Excel RHA3 analisis.xls y el ArcGis 10.2 para el graficado espacial.



## **Determinación de escenarios de sequía para diferentes condiciones de clima**

Escenario climatológico está definido como una descripción coherente, internamente consistente y plausible de un posible estado futuro del mundo. No es un pronóstico; más bien, cada escenario es una imagen alternativa de como el futuro puede desplegarse. Un pronóstico puede servir como materia prima para un escenario, pero los escenarios a menudo requieren información adicional. A menudo un conjunto de escenarios es adoptado para reflejar, tan bien como sea posible, el rango de incertidumbre en los pronósticos; y es el resultado de varios procesos de recolección, creación, perfeccionamiento y elaboración de datos.

### **a) Escenarios por sequía meteorológica**

El escenario de sequía meteorológica para el sistema hídrico del Río Culiacán se obtiene de filtrar los pronósticos de los índices de sequía SPI y PDSI a uno, dos y tres meses siguientes estimados para el OCPN mediante el SOS, conforme a lo descrito en el punto Pronóstico de las sequías meteorológicas, tanto temporal como espacialmente.

### **b) Escenarios por sequía hidrológica**

El escenario de sequía hidrológica para el sistema hídrico del Río Culiacán se determina al pronosticar para los tres meses siguientes los volúmenes mensuales de ingreso a las presas Varejonal y Sanalona, estimar los índices de escurrimiento SDI para dichos meses y obtener los respectivos índices de estado de dichas presas considerando los almacenamientos al primer día de cada mes y los programas de extracción de las presas para riego agrícola y agua potable principalmente.

### **c) Escenarios ante el cambio climático**

En los últimos años, en el OCPN se están presentando fenómenos extremos como la sequía del período 2010-2013, que fue de gran magnitud y extensión, considerándose como

la más severa de las últimas décadas. Con grandes pérdidas en la agricultura, ganadería, economía y ambiente. Además; la helada del mes de febrero de 2011, destruyó más de 500.000 has de maíz en los Distritos de Riego correspondientes a la Región Hidrológica No. 10 (RH10), por lo que para no dejar desprotegidas en lo económico a más de 100.000 familias de agricultores y ejidatarios, se resembraron más de 300.000 has de maíz, disponiendo para ello de las reservas de agua existentes en las presas, para el ciclo agrícola primavera-verano 2012, dejando las presas únicamente con agua para el ciclo otoño-invierno 2011-2012 (Ravelo, 2012; Ravelo *et al.*, 2014, Ravelo *et al.*, 2016). Por otra parte el huracán Manuel en el año 2013; la presencia de El Niño en los años 2014-2015 y los efectos del Monzón Mexicano en los años 2015-2016 (SMN, 2016). Se analizan los escenarios de estos eventos extremos para el OCPN dentro del período 2010-2015.

La situación anterior, muestra el alto grado de exposición del OCPN a los eventos hidroclimatológicos extremos, entre ellos la sequía; lo cual ante la incertidumbre de las intensidades del fenómeno que se puedan alcanzar al adicionar los efectos por cambio climático en esta región, en el corto, mediano y largo plazo; se hace necesario la gestión y el análisis de riesgo de la sequías meteorológicas, agrícolas, hidrológicas, socioeconómicas y ecológicas, en alcance a la creación de Planes de Atención de Sequías (PAS) o Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación de Sequías (PMPMS) por Consejos de Cuenca y Ciudades (Torrecillas *et al.*, 2013 y 2015) que permitan mitigar sus impactos, mediante la reducción de la exposición y la vulnerabilidad y el aumento en la resiliencia ante el fenómeno.

La adaptación al cambio climático involucra el análisis del riesgo compuesta por la determinación de la amenaza natural, el análisis de la vulnerabilidad y determinación del riesgo a la que está expuesta la población ante diferentes escenarios; así como la creación y uso de herramientas para las mediciones técnicas y no técnicas; y la preparación para la recuperación del desastre y creación de Alertas Tempranas, para así dar respuesta ante el desastre (Ravelo, 2012).

## **CAPÍTULO 3**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **MONITOREO TEMPORAL Y ESPACIAL DE LAS SEQUÍAS METEOROLÓGICAS E HIDROLÓGICAS**

Se presenta a continuación el monitoreo y análisis temporal y espacial de las sequías meteorológicas e hidrológicas, que fueron obtenidos conforme a las metodologías descritas en el capítulo 2 Materiales y Métodos.

#### **MONITOREO DE SEQUÍAS METEOROLÓGICAS**

El monitoreo temporal y espacial de las sequías meteorológicas, se llevó a cabo mediante el análisis de las anomalías de precipitación con respecto a los valores normales y los índices locales SPI y PDSI, y satelital (NDVI), en el Organismo de Cuencas del Pacífico Norte (OCPN).

##### **Normales climatológicas de precipitación en el OCPN**

Se describe la normal climatológica de precipitación para todo el OCPN, la cual se estimó sobre la base de los registros históricos de 49 estaciones para el período 1978-2015.

Las principales lluvias en el OCPN ocurren en el verano, principalmente durante los meses de junio a octubre. Son lluvias de tipo convectivo y están asociadas con eventos ciclónicos que afectan recurrentemente a la región. Los eventos ciclónicos se originan en el sur del país, en la línea de convergencia intertropical y se desplazan en diferentes direcciones, principalmente al norte y al oeste, por lo que las primeras lluvias siempre ocurren al sur del OCPN, así como la mayor frecuencia e intensidad anual. Otro factor que influye en la distribución e intensidad de la precipitación es la condición geográfica y la altitud de la sierra Madre Occidental.

En la Figura 3.1, se ilustra el comportamiento de las normales climatológicas de precipitación acumulada anual en el OCPN, en su variabilidad espacial continua construida mediante interpolación de las normales climatológicas, utilizando la información de las 49 estaciones que forman la red pluviométrica.

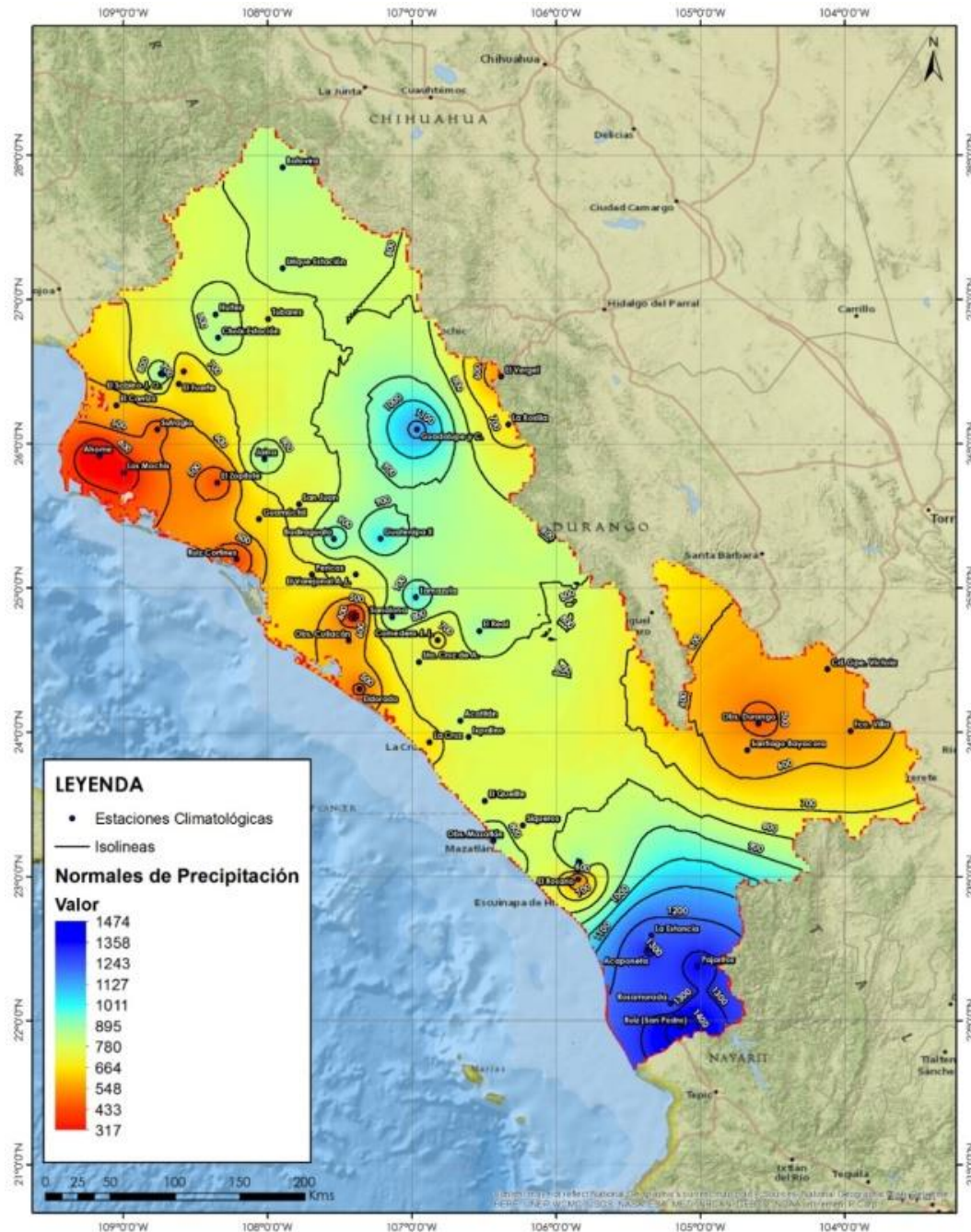


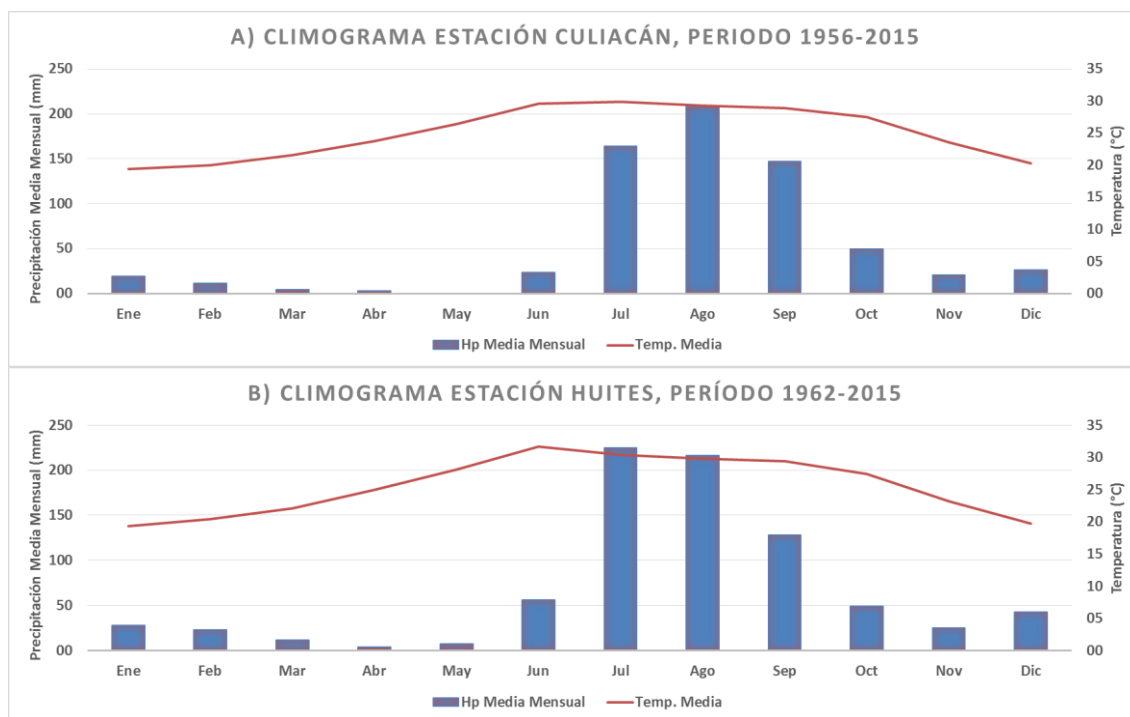
Figura 3.1. Isoyetas de normales de precipitación en el Organismo de Cuencas del Pacífico Norte (OCPN), en el período 1978-2015

El análisis demuestra que la mayor cantidad de lluvia anual se presentan en la parte sur de la Región, alcanzando valores de hasta 1.474 mm en el estado de Nayarit, registrada en la estación climatológica Ruíz; descendiendo conforme el territorio se extiende hacia al norte-noroeste; los valores de las normales de precipitación todavía alcanzan valores superiores a los 1.000 mm en los límites con el estado de Sinaloa. En la estación climatológica El Rosario, los valores de la precipitación disminuyen a menos de 700 mm; al igual, conforme se incrementa la altitud en la Sierra Madre Occidental, los valores de la normal climatológica de precipitación (NCP) también disminuyen hasta alcanzar los 500 mm en la ciudad de Durango, Dgo., de acuerdo con los valores registrados en el Observatorio Climatológico Durango. En la sierra Madre Occidental las NCP alcanzan valores entre los 700 y 800 mm anuales, a excepción de la zona de la sierra enclavada en la zona del “Triángulo Dorado”, que es la zona límite entre los estados de Chihuahua, Sinaloa y Durango; en esta zona de la sierra se alcanzan valores de hasta 1.100 mm anuales.

En cambio, sobre la costa, conforme se avanza hacia el noroeste, los valores de la NCP disminuyen, alcanzando valores superiores a 660 mm en la zona centro, de acuerdo a los registros de la estación climatológica Culiacán; y alrededor de 500 mm en la zona agrícola de los ríos Fuerte, Sinaloa y Mocorito. La zona del Carrizo, Sinaloa, es donde la lluvia anual presenta los registros más bajos, con valores menores a los 400 mm anuales. También, en la misma Figura 3.1 se observa que las precipitaciones son mayores en la parte alta de la sierra Madre Occidental, intermedias en las estribaciones de la sierra y los valores menores se presentan sobre la línea de costa. Es importante resaltar que en la mayor parte del OCPN la precipitación media anual (PMA) de carácter normal fluctúa entre los 600 mm y 800 mm y su media histórica anda alrededor de los 700 mm. Por otra parte, la zona de la Sierra Madre Occidental, en la parte centro norte del Organismo y área de captación de las cuencas que conforman la RH10 donde se encuentran las principales presas del OCPN, tiene Normales climatológicas de precipitación mayor a la media de la zona, fluctuando entre 800 y 1100 mm.

En lo que respecta a las normales climatológicas de precipitación mensual (por estación), se describe su comportamiento estacional mediante el análisis de las estaciones Culiacán y Huites, localizadas en la parte baja del río Culiacán y parte media del río

Fuerte, respectivamente que, combinados con las normales de temperatura, conforman los climogramas de las estaciones climatológicas, como se muestra en las Figuras 3.2 A y B.



Figuras 3.2. Normales de precipitación mensual en las estaciones: a) Culiacán y b) Huites.

En las Figuras 3.2 A y B se observan algunos datos de interés. El período en verano de junio a septiembre presenta mayores cantidades de lluvia totalizando más del 70% de la precipitación acumulada anual (PAA). Se tiene un período de estiaje bien definido entre los meses de los meses de febrero (a finales) a junio (a principios), cuando la precipitación es prácticamente nula. En la estación Culiacán el mes de mayor lluvia es agosto y en Huites es julio; en ambos casos los meses más lluviosos son julio, agosto y septiembre, por lo que la sequía durante estos meses tiene mayores efectos en los sectores agrícolas, generación de energía eléctrica, económicos y sociales. También se observa que en la estación Huites la precipitación en los meses diciembre, enero y febrero es mayor relativamente debido a la presencia de los frentes fríos del norte que producen mayores precipitaciones invernales que en el resto del OCPN.

La lluvia media mensual sobrepasa 200 mm en agosto en la estación Culiacán, lo mismo que para julio y agosto en la estación Huites, en el estado de Sinaloa. En cambio,

los valores mínimos ocurren en el mes de mayo en la estación Culiacán y en abril en la estación Huites, con valores muy cercanos a cero.

Las temperaturas medias mensuales fluctúan entre 18°C en invierno (durante los meses de diciembre y enero) y valores superiores a los 30°C durante el verano (en los meses de junio a septiembre). La mayor temperatura se da durante el mes de julio en la estación Culiacán y el mes de junio en Huites.

Las anomalías de precipitación anual y mensual nos dan una buena idea del comportamiento temporal y espacial de las lluvias en el OCPN.

### **Variabilidad temporal de la sequía meteorológica**

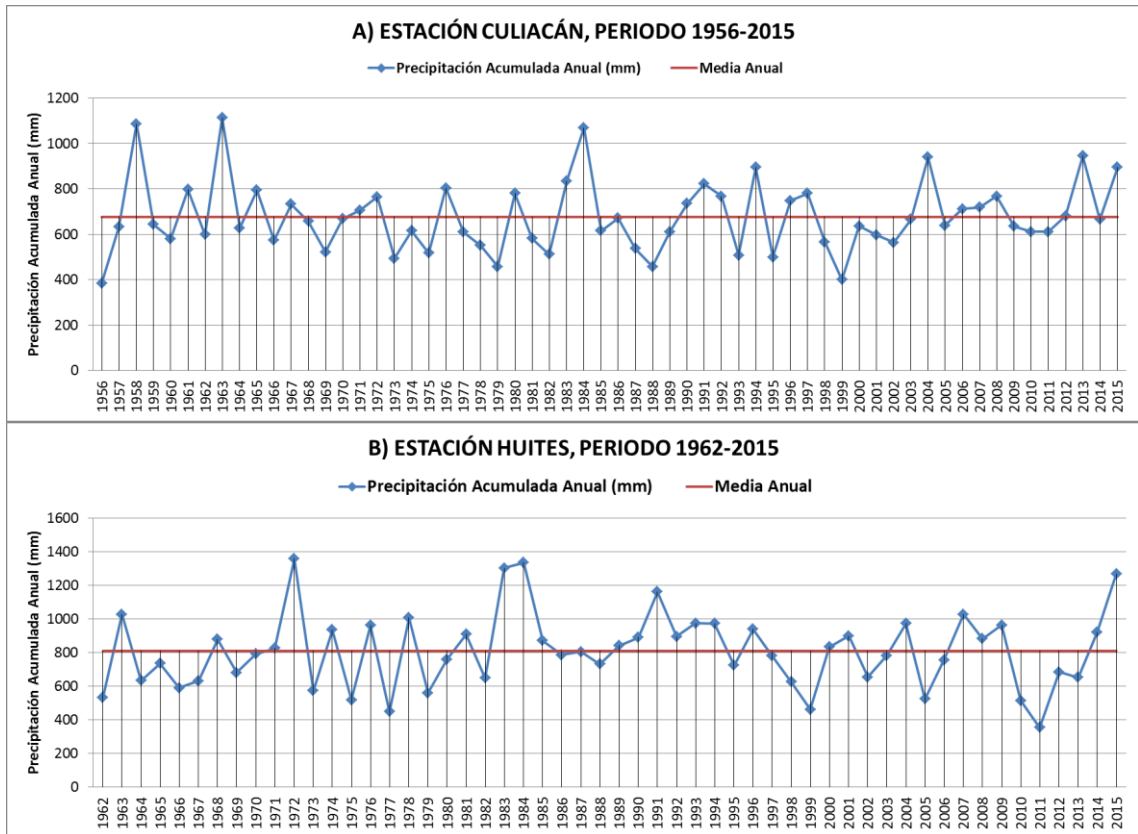
En esta sección se analizan los resultados de la variabilidad temporal de la sequía meteorológica mediante las anomalías temporales de precipitación y los índices SPI, PDSI y NDVI, conforme a la metodología propuesta en el capítulo anterior. Para ello, se han seleccionado algunas estaciones representativas y períodos en donde se ha presentado sequía, de acuerdo a los PMPMS de los Consejos de Cuenca del OCPN (Torrecillas *et al.*, 2013); así mismo se identifican los períodos normales y húmedos.

### **ANOMALIAS TEMPORALES DE PRECIPITACIÓN**

Las anomalías de lluvia temporales se estimaron mediante la diferencia del valor anual con respecto al valor medio normal, históricos para cada una de las estaciones, y de forma similar se estimaron las anomalías de la precipitación mensual.

Como ejemplo representativo de la variabilidad de las precipitaciones en las estaciones del OCPN, se muestran los resultados de las estaciones climatológicas Culiacán y Huites, la primera localizada en la zona centro y la segunda en la zona norte del OCPN (Figura 3.3).





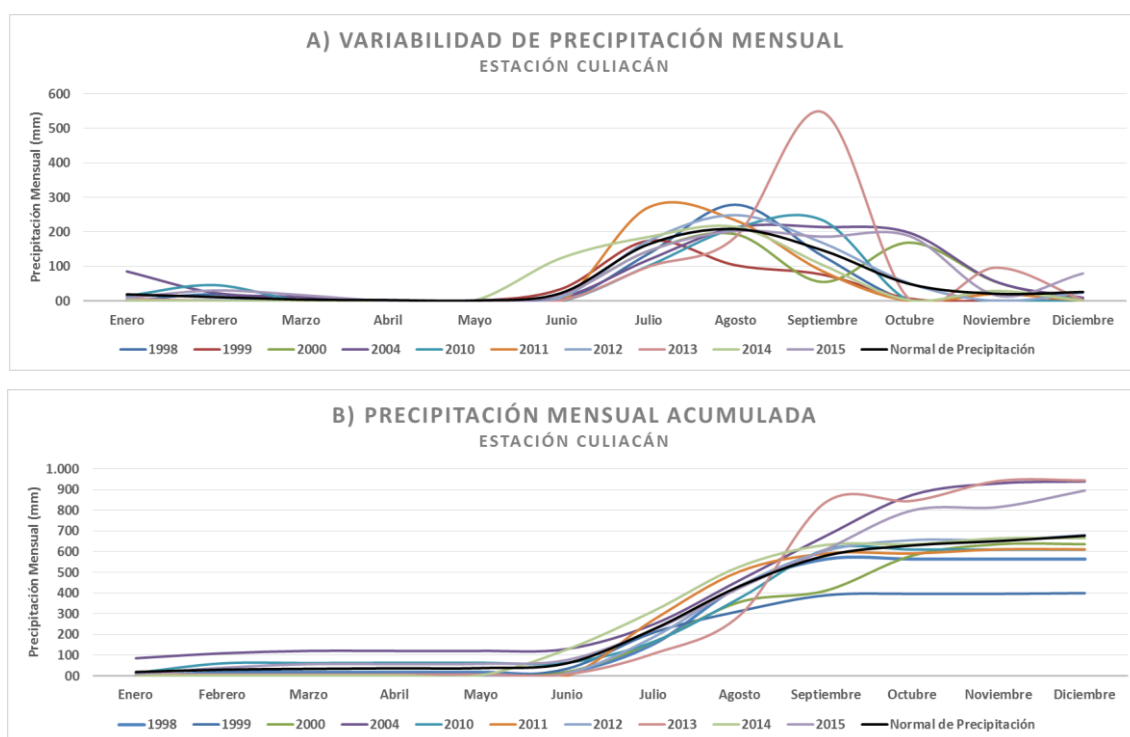
Figuras 3.3. Variabilidad anual de las precipitaciones en las estaciones: A) Culiacán y B) Huites.

Las figuras muestran los años húmedos, normales y secos, con respecto a la media (en color rojo). En Culiacán sobresalen los años y períodos húmedos 1958, 1963, 1983-1984, 1994, 2004, 2013 y 2014, y años y períodos secos 1956, 1969, 1973-1975, 1977-1979, 1982, 1987-1989, 1993, 1995, 1998-2002, 2010-2012; en Huites los años y períodos húmedos sobresalientes son 1972, 1983-1984, 1991-1994, 2007-2009 y 2014-2015, y años secos 1964-1967, 1975, 1977, 1979, 1998-1999, 2005, 2010-2013; con estos resultados se observa que los años húmedos y secos no necesariamente son los mismos en sitios diferentes, como se aprecia entre Culiacán (en la zona centro) y Huites (en la zona norte). Por ello es conveniente analizar las sequías meteorológicas e hidrológicas por cuenca; mientras los años húmedos se dan por años puntuales en Culiacán y pequeños períodos húmedos, estos años húmedos son debido a presencia de ciclones y el monzón mexicano; en cambio los secos, se dan por períodos extendidos de tiempo; la sequía más severa y extensa en Culiacán fue en 1998-2000 y la más intensa 1999 en donde la precipitación acumulada anual fue de 400 mm cuando la media es de 676,3 mm; y en Huites las más severa y extensa fue 2010-2013, alcanzando mayor intensidad en el año 2011 en donde la

precipitación acumulada anual fue inferior a los 400 mm, cuando su media histórica supera los 800 mm.

Para observar el comportamiento espacial de los eventos extremos húmedos y secos en el OCPN, en el siguiente subcapítulo se hace un análisis del período 2010-2015, que incluye la sequía 2010-2013, el huracán Manuel en el año 2013, año normal 2014 y años húmedo 2015, debido a la presencia de El niño y el Monzón Mexicano en esta zona del país.

En la Figura 3.4 se muestran las anomalías de lluvia temporales: A) mensuales, comparadas con precipitación mensual normal y B) acumulada mensual, comparada con las normales mensuales acumulada, para algunos años seleccionados de la estación Culiacán; las correspondientes a las estaciones Sanalona, Varejonal, Huites, Guamúchil, Comedero y otras se muestran en el Anexo 2.



Figuras 3.4. Anomalías de precipitación en la estación Culiacán: A) mensuales y B) acumulada anual para los años secos y húmedos.

En la Figura 3.4 se observan los años secos 1998, 1999, 2000, 2010, 2011, 2012 y los años húmedos 2004, 2013, 2014, 2015. Es notorio el comportamiento del año 2013 que siendo uno de los más secos hasta el mes de agosto, con la ocurrencia del huracán Manuel en septiembre de 2013, se convirtió en uno de los más húmedos históricos. En cambio, el año 2011 es uno de los más húmedos hasta el mes de julio en donde a partir de este mes inicia una disminución importante en la lluvia hasta convertirse en un año con sequía. El mes que más llueve es agosto, el año más húmedo 2015 y el año más seco 1999.

### **Índice SPI**

Se presentan los resultados del SPI para las escalas de tiempo de 1, 3, 6 y 12 meses del período 1978-2015, de las estaciones Culiacán, Sanalona, Varejonal, Huites, Bacurato, Comedero, Mazatlán y Guamúchil.

En la Tabla 3.1 se muestran los valores del SPI3 (indicador de sequía a corto plazo) de la estación Culiacán, indicativos de las sequías en el valle agrícola de Culiacán y costa del centro del estado de Sinaloa. Las sequías han presentado diversa intensidad y duración a lo largo del tiempo, desde sequías incipientes en diferentes meses del año hasta condiciones extremas en los meses de julio, agosto y octubre en diferentes años, sobresaliendo 1979, 1982 y 1999. Si bien es cierto que son pocos los años con sequías extremas, las otras fases con diferentes duraciones se han combinado para provocar cuantiosos daños por sequía en la agricultura, ganadería, generación de energía eléctrica, abastecimiento de agua potable acuacultura y medio ambiente con severos impactos sociales. Las sequías severas se han presentado con mayor frecuencia que las extremas ya que también se han presentado en los meses de septiembre y noviembre de diferentes años. No existe mes dentro del período de análisis en el cual no se haya presentado el fenómeno en alguna de sus fases; así mismo, los períodos de sequía han sido variados, desde muchos de corta duración hasta muy pocos de larga duración.

De acuerdo con los valores de la Tabla 3.1, los valores extremos del SPI3 estimados para la estación Culiacán, son -2,08, -2,42, -2,59 y -2,39 que representan a sequías

extremas registradas en julio de 1982, agosto de 1979, agosto de 1982 y octubre de 1999, respectivamente. En cambio, en este período se ha presentado humedad extrema prácticamente en todos los meses, a excepción de noviembre y diciembre, pero en diferentes años, con valores del índice de 3,30. Los años más secos fueron 1979,1982, 1999, 2010, 2011 y 2012 y los húmedos 1984, 1994, 2004, 2008, 2013, 2014 y 2015; como puede observarse durante la última década hemos tenidos las sequías y las humedades más intensas de este período de análisis.

Tabla 3.1. Valores del SPI a 3 meses del período 1978-2015 en la Estación Culiacán.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
1978			0,45	1,05	0,16	-0,18	-0,63	-0,67	-1,03	-0,31	-0,31	0,54	-0,09
1979	0,62	0,97	1,09	0,67	0,72	0,57	-0,86	-2,41	-1,56	-1,32	-0,11	-0,86	-0,21
1980	-0,55	-0,33	-0,39	0,05	0,72	-0,31	-0,81	-0,22	0,11	1,75	1,55	1,44	0,25
1981	1,12	1,20	1,66	0,54	1,41	0,60	-0,89	-1,33	-1,91	-0,46	-0,06	0,59	0,21
1982	-0,78	-0,5	-0,19	-0,43	0,16	-0,58	-2,08	-2,59	-1,60	-0,90	0,62	0,80	-0,68
1983	1,38	1,31	1,48	2,46	3,30	1,04	-0,06	0,04	-0,07	-0,29	0,70	1,15	1,04
1984	1,87	1,10	1,25	-0,43	0,93	2,84	2,49	2,04	1,18	0,00	0,19	1,02	1,21
1985	1,43	1,51	0,73	0,58	0,44	1,40	0,48	0,16	-0,91	-0,36	-0,37	0,47	0,46
1986	-0,55	-0,20	0,18	0,89	1,72	0,90	0,33	-0,34	-1,23	0,23	0,62	1,38	0,33
1987	-0,45	-0,23	-0,39	-0,43	0,16	-0,58	-0,10	0,25	-0,21	-0,64	-1,49	-0,29	-0,37
1988	0,06	0,22	-0,92	-0,43	0,16	-0,58	-0,83	-0,30	-0,77	-0,73	-1,54	-0,71	-0,53
1989	0,05	0,44	0,56	0,54	0,16	-0,58	0,09	0,18	-0,54	-0,64	-0,58	0,62	0,03
1990	0,54	0,29	0,24	0,63	0,16	0,84	1,82	1,08	0,16	-1,58	-0,80	0,90	0,36
1991	0,98	0,75	-0,61	-0,17	0,16	-0,58	0,79	-0,04	0,72	-0,36	0,59	1,30	0,29
1992	2,65	2,78	2,53	1,05	0,59	-0,18	0,00	0,28	0,11	-0,38	-0,95	-0,97	0,63
1993	-0,27	-0,17	0,21	0,13	0,16	-0,58	-1,76	-0,47	-0,83	-0,22	-0,59	-0,01	-0,37
1994	0,20	-1,25	0,29	0,86	1,88	1,75	1,36	2,05	1,72	1,03	-0,09	0,19	0,83
1995	0,16	0,13	-0,92	-0,43	0,16	-0,58	-0,42	-0,28	-0,21	-0,41	-0,72	-1,41	-0,41
1996	-1,41	-1,25	-0,92	-0,43	0,16	1,09	0,92	0,72	1,42	0,97	1,02	0,15	0,20
1997	0,37	0,29	0,69	1,35	2,93	1,89	0,68	-0,10	0,34	-0,25	0,63	0,52	0,78
1998	0,88	0,69	0,29	0,86	0,16	-0,58	-0,49	0,35	0,23	0,07	-0,99	-1,41	0,00
1999	-1,41	-1,25	-0,92	-0,43	0,16	1,09	0,45	-0,63	-1,70	-2,39	-1,74	-0,90	-0,81
2000	-0,97	-0,75	-0,92	-0,43	0,16	0,67	-0,11	-0,18	-1,27	0,13	0,56	1,34	-0,15
2001	0,35	-0,68	0,47	1,08	2,03	-0,18	1,06	0,65	0,08	-1,01	-1,20	-0,24	0,20
2002	-0,78	-0,14	0,08	0,54	0,16	-0,58	-0,33	-1,71	-0,14	-0,07	0,94	-0,12	-0,18
2003	-0,55	-0,14	0,14	0,67	0,16	0,67	0,37	-0,13	0,65	0,34	0,62	-0,31	0,21
2004	0,77	1,16	1,75	1,35	1,47	0,33	-0,61	-0,34	0,22	1,67	1,87	1,55	0,93
2005	0,73	1,52	1,96	2,85	0,16	-0,58	-0,17	-0,14	-0,57	-0,68	-1,00	-0,36	0,31
2006	-0,90	-0,97	-0,61	-0,43	0,16	0,97	0,63	0,12	0,12	-0,32	-0,13	-0,29	-0,14
2007	-0,22	0,20	0,45	0,49	0,16	0,18	-1,79	0,02	0,87	1,27	0,62	0,09	0,20
2008	0,42	0,13	-0,92	-0,43	0,16	0,28	-0,46	1,48	1,69	1,70	-0,07	-0,42	0,30
2009	-1,07	-0,85	-0,31	-0,05	0,59	0,95	0,30	0,33	-0,57	0,05	-0,23	0,74	-0,01
2010	-0,01	0,81	1,10	1,62	0,83	-0,18	-1,47	-0,68	0,22	0,53	0,19	-1,41	0,13
2011	-1,41	-1,25	-0,92	-0,43	0,16	-0,58	0,82	1,09	0,61	-0,51	-1,34	-0,61	-0,36
2012	-0,27	-0,75	-0,39	0,05	0,16	0,37	0,26	0,54	0,69	0,55	0,08	0,23	0,13
2013	-0,03	0,19	-0,14	-0,43	0,16	-0,18	-1,09	-0,94	2,39	2,37	2,84	0,53	0,47

Cont... Tabla 3.1. Valores del SPI a 3 meses, período 1978-2015, Estación Culiacán.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
2014	0,87	-0,61	-0,48	-0,43	0,59	1,57	2,02	1,74	0,92	-0,76	-0,91	-0,16	0,36
2015	0,05	0,33	1,00	1,66	1,77	0,70	-0,28	0,43	0,69	1,90	1,47	1,67	0,95
Media	0,10	0,13	0,23	0,43	0,67	0,35	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,17
Mínima	-1,41	-1,25	-0,92	-0,43	0,16	-0,58	-2,08	-2,59	-1,91	-2,39	-1,74	-1,41	-0,81
Máxima	2,65	2,78	2,53	2,85	3,30	2,84	2,49	2,05	2,39	2,37	2,84	1,67	1,21

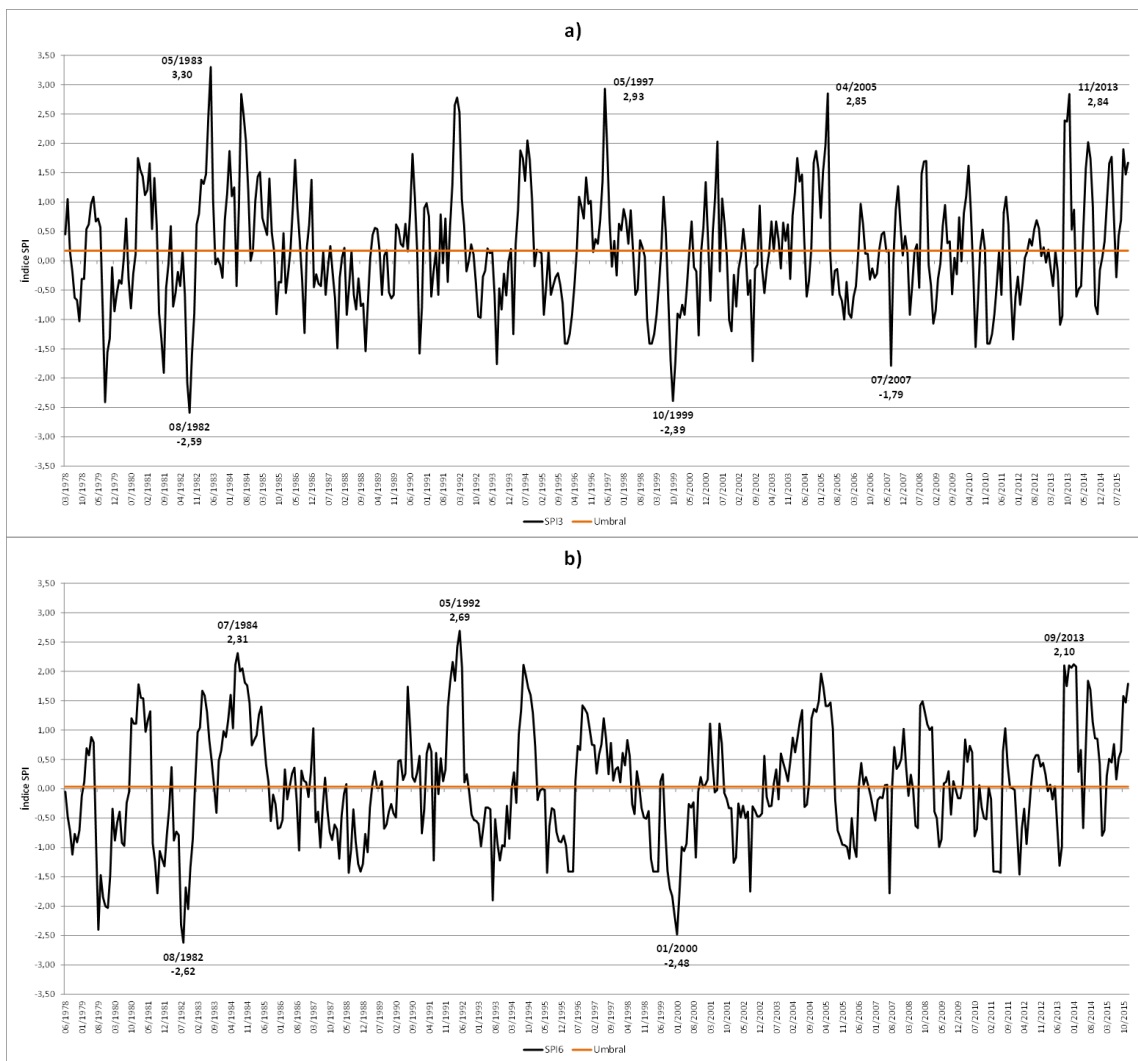
El análisis de los resultados del SPI a 6 meses (indicador de sequías a mediano plazo) confirman la presencia de sequías extremas en los meses de agosto, noviembre y diciembre de 1979, julio, agosto y octubre de 1982, diciembre de 1999 y enero de 2000; con valores del SPI desde -2,0 a -2,62. Las sequías de mayor duración y más intensas han sido 1979-1980, 1982, 1987-1989, 1999-2000, 2011-2012 y las condiciones de humedad más extremas en los periodos 1983-1985, 1991-1992, 1994,1996, 2004-2005, 2008, 2013-2015.

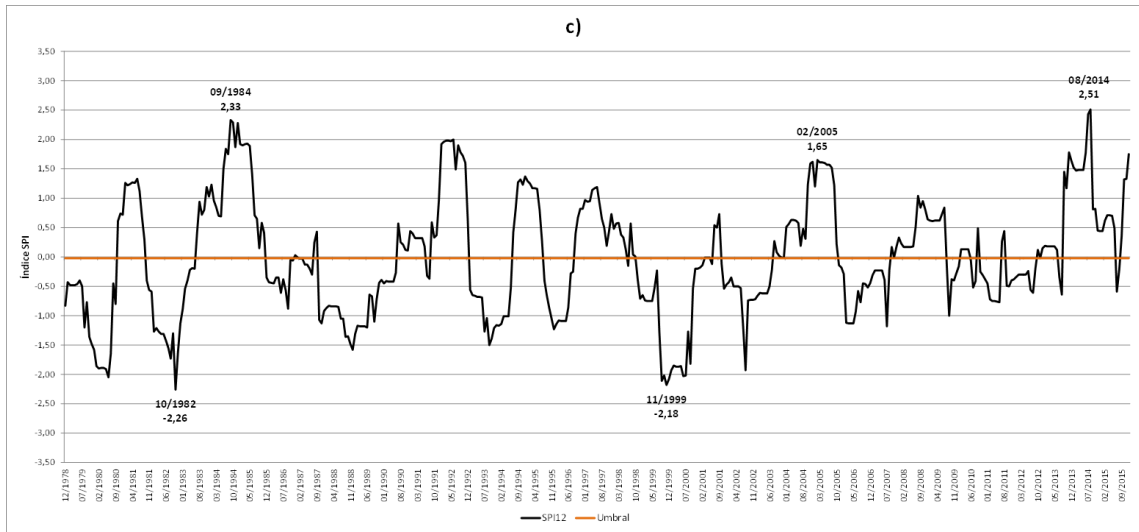
Los resultados del indicador de sequías a largo plazo o indicador hidrológico SPI12, manifiestan la presencia de sequía hidrológica en los períodos 1979-1980, 1988-1989, 1999-2000, 2002, 2011, 2012 y 2013. Siendo sequía hidrológica extrema en los meses junio de 1980, octubre de 1982, septiembre-diciembre de 1999 y junio-julio de 2000. Las extensas han sido enero-julio de 1980, enero de 1982-enero de 1983, octubre de 1987-octubre de 1989, julio de 1993 – mayo de 1994, agosto de 1999-octubre de 2002, febrero-mayo de 2006, febrero-junio de 2011. Manifestaciones importantes de humedad en los períodos enero-julio de 1981, noviembre de 1983-agosto de 1985, enero-diciembre de 1992, agosto de 1994- junio de 1995, abril-junio de 1997, octubre 2004- septiembre de 2005, septiembre de 2013-octubre de 2014 y octubre-diciembre de 2015. Los años más secos corresponden a 1980, 1982, 1988, 1999 y 2000; y los más húmedos a 1984, 1985, 1992, 2005 y 2014. El período de junio a diciembre es más propenso a los eventos extremos, a excepción de agosto en lo referente a sequías y a noviembre en lo relativo a la humedad.

De acuerdo con el resultado del análisis del SPI en sus escalas de 3, 6 y 12 meses, los años más secos fueron, 1979-1980, 1982, 1987-1989, 1999-2000, 2011-2012 y los más húmedos 1983-1985, 1991-1992, 1994,1996, 2004-2005, 2008, 2013-2015. Como puede

observarse durante esta última década se han presentado las sequías y las humedades más intensas de este período de análisis. De esta forma, el 24% del período está expuesto a sequías extremas y 29% a condiciones de abundante humedad. Esto es, alrededor del 50% del tiempo el OCPN está expuesto a eventos extremos de los cuales prácticamente la mitad es por sequía. Lo que corresponde al carácter normal del SPI.

En las Figuras 3.5, se muestra la variación histórica del índice SPI a escalas a 3, 6 y 12 meses (SPI3, SPI6, SPI12) para la estación Culiacán.





Figuras 3.5. Variación histórica de los índices a) SPI3, b) SPI6 y c) SPI12, del período 1978-2015 en Culiacán.

En la Figura 3.5 se observa como conforme crece la escala en el tiempo las curvas del SPI se suavizan producto del promedio móvil que asigno su valor. Se muestran períodos de sequías de diferente magnitud y duración, sobresaliendo tres sequías extremas, en junio de 1979 con un SPI3 = -2,4, en agosto de 1982 con SPI3 = -2,59 y en octubre de 1999 con SPI3= -2,39; seis sequías severas siendo la más importante la de agosto de 2007 con SPI3= -1,79; once sequías moderadas y varias de fase incipiente. Los períodos de mayor duración son 1978-1979, 1979-1980, 1981-1982, 1994-1995, 1998-1999, 2005-2006, 2010-2012. En cambio, en los años húmedos destacan valores de SPI3 muy altos de humedad extrema en mayo de 1983, junio de 1984, mayo de 1997, abril de 2005, septiembre a noviembre de 2013 y junio de 2014, con valores de 3,30, 2,8, 2,93, 2,85, 2,84 y 2,01, respectivamente.

Considerando que el mes de agosto es históricamente el más lluvioso y por tanto las sequías tienen mayor amenaza ambiental, económico y social, su análisis en cuanto a las sequías más intensas en este mes arroja los resultados siguientes: en Comedero ocurrió en 1991 con -2,23 en cambio en 2011 fue de -0,85, en Guamúchil fue en 2005 con -2,34 y en 2011 con 0,17, en Sanalona fue en 1982 con -2,11y en 2011 con 0,86, en Culiacán fue en 1982 con -2,59 y en 2011 con 1,09 y en Varejonal fue 1998 con -2,08 y en 2011 con 0,47, en cambio en 2013 se tuvo -1,54, con -1,90 en el mes anterior (julio) y en el posterior (septiembre, ciclón Manuel) se alcanzó un valor de 1,16 acabando con la sequía histórica.

Si se analiza en forma conjunta los meses de julio, agosto y septiembre del período de 1978-2015 que son los más lluviosos del año y en donde ocurre más del 70% de la precipitación anual, se determinó que los años en el que este período fue más afectado por la sequía fueron: 1982, 1998, 2000, 2010 y 2013 en el Varejonal; 1979, 1981, 1982, 1993, 1999, 2010 y 2013 en Culiacán; 1979, 1982, 1993 y 2010 en Sanalona; 1979, 1982, 1991, 1998, 2002, 2005 y 2010 en Guamúchil y 1982, 1983, 1991, 1993, 1997, 2002, 2003, 2010 y 2011.

Estas sequías afectaron la condición hidrológica de las cuencas y en los volúmenes de almacenamiento en las presas, con impactos en el sector ganadero, agrícola (principalmente de temporal), abastecimiento de agua potable en comunidades rurales, disminución en la generación de energía eléctrica y otros usos del agua.

### Índice PDSI

En la Tabla 3.2 se presentan los resultados del PDSI para el período 1978-2015, de la estación Culiacán.

Tabla 3.2. Valores del índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) para el período 1978-2015, en la estación Culiacán.

Estación Climatológica Culiacán													
PDSI													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
1978	0,0	1,2	1,9	1,8	0,0	-0,5	-0,8	-1,0	-1,5	-1,5	-2,1	-1,9	-0,4
1979	-1,2	-1,2	-1,4	-1,4	-1,0	-1,1	-1,7	-3,1	-2,6	-3,1	-3,4	-3,4	-2,1
1980	-3,5	-3,5	-3,3	-3,1	-2,8	-2,9	-3,1	0,3	0,4	2,8	3,2	3,0	-1,0
1981	4,6	4,3	4,1	3,9	0,0	-0,2	-0,9	-1,5	-2,2	-1,8	-2,5	-2,8	0,4
1982	-2,9	-3,0	-3,0	-2,8	-2,5	-2,7	-3,6	-4,3	-3,8	-4,1	0,8	1,4	-2,5
1983	1,3	2,0	2,5	3,5	3,5	2,6	2,3	2,2	1,7	1,1	3,0	3,2	2,4
1984	4,1	3,6	3,2	2,7	2,8	6,6	7,2	6,8	6,5	5,8	5,4	6,8	5,1
1985	6,5	5,9	5,2	4,6	4,1	4,5	0,0	-0,3	-1,0	-0,8	-1,5	-1,9	2,1
1986	-2,0	-2,1	-2,2	-1,3	-1,2	-1,2	-0,8	-1,2	-2,1	1,4	1,4	-0,1	-1,0



Cont... Tabla 3.2. Valores del índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) para el período 1978-2015, en la estación Culiacán.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
1987	-0,4	-0,8	-0,9	-1,0	-0,9	-1,3	-1,2	-0,7	-1,1	-1,7	-2,2	-1,9	-1,2
1988	-2,2	-2,4	-2,4	-2,3	-2,1	-2,3	-2,6	-2,1	-2,3	-3,0	-3,4	-3,3	-2,5
1989	-3,0	-2,8	-2,8	-2,6	-2,4	-2,6	-2,1	-1,7	-2,2	-2,2	-1,7	-1,6	-2,3
1990	-1,8	-1,7	-1,7	-1,7	-1,5	0,2	2,2	1,9	1,1	0,9	1,1	1,9	0,1
1991	-0,4	-0,7	-0,8	-0,9	-0,9	-1,3	0,9	0,4	0,9	0,6	1,0	3,9	0,2
1992	7,7	8,8	10,1	9,4	0,0	-0,5	0,1	0,5	-0,2	-0,7	-1,1	-1,6	2,7
1993	-1,7	-1,8	-2,0	-1,9	-1,7	-2,0	-2,9	-2,1	-2,1	-2,3	-1,9	-2,2	-2,1
1994	-2,4	-2,6	0,4	0,2	0,2	1,8	2,3	3,9	3,7	3,4	3,0	2,8	1,4
1995	-0,4	-0,8	-0,9	-1,0	-1,0	-1,4	-1,4	-1,3	-1,3	-1,9	-2,3	-2,6	-1,4
1996	-2,8	-3,0	-2,9	-2,7	-2,5	0,5	1,2	1,2	2,4	2,4	2,4	1,8	-0,2
1997	2,0	1,4	1,0	2,7	2,9	3,1	3,1	2,2	2,3	1,7	2,1	2,3	2,2
1998	-0,4	-0,2	-0,4	-0,5	-0,5	-1,0	-1,2	0,7	-0,1	-0,4	-0,9	-1,3	-0,5
1999	-1,7	-1,9	-2,0	-1,9	-1,8	-1,0	-0,7	-1,7	-2,5	-3,5	-4,0	-4,1	-2,2
2000	-4,1	-4,1	-3,9	-3,6	-3,2	-2,8	-2,7	-2,5	-3,2	0,9	1,6	-0,4	-2,3
2001	-0,8	-1,0	-0,3	-0,4	-0,4	-0,8	1,2	1,2	-0,4	-0,4	-0,8	-1,2	-0,3
2002	-1,5	-1,5	-1,6	-1,6	-1,4	-1,8	-1,7	-3,0	0,7	0,8	0,7	-0,4	-1,0
2003	-0,8	-0,7	-0,9	-1,0	-0,9	-0,8	-0,4	-0,8	0,7	0,7	0,5	0,0	-0,4
2004	1,4	1,5	1,6	-0,1	-0,2	-0,4	-0,8	0,0	0,4	2,6	3,8	3,8	1,1
2005	3,7	6,5	7,0	6,4	0,0	-0,5	-0,5	-0,5	-1,0	-1,6	-2,1	-2,5	1,2
2006	-2,7	-2,9	-2,8	-2,7	-2,4	0,4	0,8	0,4	0,4	1,5	1,5	-0,1	-0,7
2007	-0,1	-0,2	-0,4	-0,5	-0,5	-0,7	-1,8	1,1	2,2	-0,2	0,1	0,3	-0,1
2008	-0,4	-0,8	-1,0	-1,0	-1,0	-1,1	-1,3	2,3	2,5	2,3	-0,2	-0,7	0,0
2009	-1,0	-1,4	-1,4	-1,4	-1,3	0,4	0,4	0,5	-0,7	-0,1	-0,5	-0,6	-0,6
2010	-0,7	0,8	-0,2	-0,3	-0,2	-0,7	-1,5	0,2	0,9	-0,3	-0,7	-1,2	-0,3
2011	-1,5	-1,8	-1,9	-1,8	-1,7	-2,0	1,0	1,8	-0,4	-0,7	-1,0	-1,5	-1,0
2012	-1,8	-2,0	-2,0	-2,0	-1,8	-1,7	0,3	0,7	0,9	1,2	0,0	0,1	-0,7
2013	-0,3	-0,6	-0,8	-0,9	-0,9	-1,2	-1,8	-1,8	3,6	3,0	4,0	3,4	0,5
2014	2,7	2,0	1,6	1,2	1,2	2,3	3,9	4,1	3,4	2,8	2,5	1,7	2,5
2015	1,1	1,4	1,7	1,3	1,1	1,1	0,6	1,2	1,6	3,5	3,9	5,1	2,0
Media	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,6	-0,3	-0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1	-0,1
Mínima	-4,1	-4,1	-3,9	-3,6	-3,2	-2,9	-3,6	-4,3	-3,8	-4,1	-4,0	-4,1	-2,5
Máxima	7,7	8,8	10,1	9,4	4,1	6,6	7,2	6,8	6,5	5,8	5,4	6,8	5,1

Con los valores del PDSI se construyeron las Figuras 3.6 a y b, que ilustran claramente los períodos de sequías de diversas intensidades que se han registrado en la estaciones Culiacán (Figura 3.6a) y Huites (Figuras 3.6b) a lo largo del período 1978-2015.

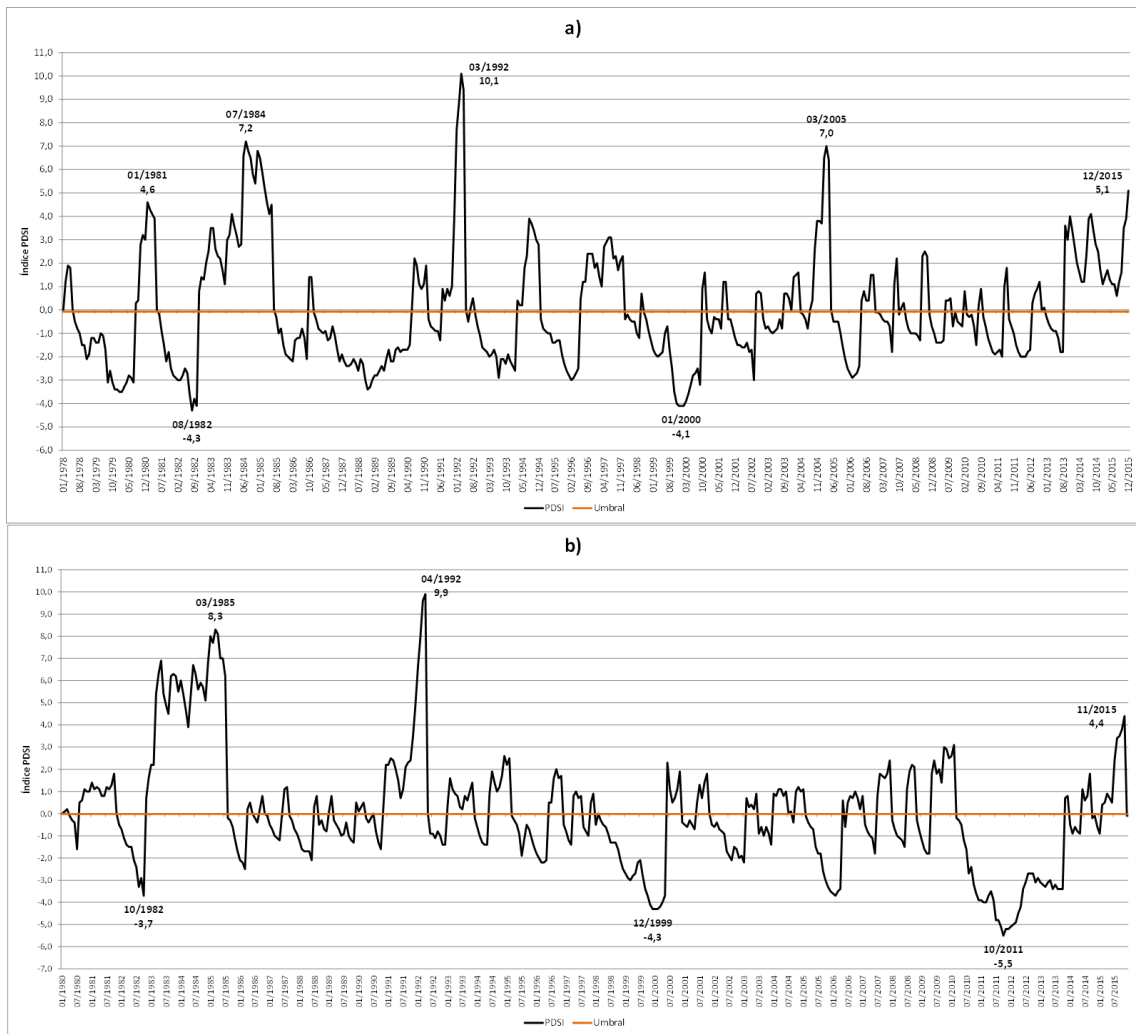


Figura 3.6. Valores del PDSI, a) Estación Culiacán y b) Estación Huites. Período 1978-2015

Se observa que se han presentado sequías de diversas intensidades y duraciones, que van desde sequías incipientes en diferentes meses del año hasta sequía extrema en los meses de enero, febrero, agosto, octubre, noviembre y diciembre en diferentes años, sobresaliendo 1982, 1999 y 2000. Las sequías severas se han presentado con mayor frecuencia que las extremas, registrándose en casi todos los meses a excepción de los de junio y diciembre de diferentes años. No existe mes dentro del período de análisis en el cual no se haya presentado el fenómeno en alguna de sus fases; asimismo, los períodos de sequía han sido variados, desde muchos de corta duración hasta muy pocos de larga duración. La sequía efímera es más frecuente que los episodios más extremos.

De acuerdo con los valores tabulados y graficados para Culiacán, los valores extremos del PDSI, son -4,1, -4,3 y -4,0 que representan 4 sequías extremas registradas en los meses de enero y febrero de 2000, octubre de 1982, noviembre y diciembre de 1999 y agosto de 1982, respectivamente. En cambio, en este período se ha presentado humedad extrema prácticamente en todos los meses (pero en diferentes años), con valores del índice de hasta 10,1 en marzo de 1992. Los años más secos fueron 1979-1980, 1982, 1988-1989, 1999-2000, 2011-2012 y los más húmedos 1983-1985, 1992,1994, 1996-997, 200-2005, 2008, 2013, 2014 y 2015.

En la estación Huites se presentan períodos secos y húmedos parecidos a los de la estación Culiacán; los períodos secos sobresalientes son: noviembre de 1981 a noviembre de 1982 con una intensidad máxima de PDSI=-3,7 en octubre de 1982 que corresponde a sequía severa; febrero de 1998 a mayo de 2000 con una intensidad máxima de PDSI= -4,3 en los meses de diciembre de 1999 a febrero de 2000, y valores inferiores a -4,0 hasta abril de 2000, que corresponden a sequía extrema: febrero de 2005 a mayo de 2006 con intensidad máxima de PDSI= -3,6 en enero de 2006 y la última importante de marzo de 2010 a diciembre de 2013, con sequía extrema de septiembre de 2011 a julio de 2012 con valores de PDSI menores a -4,2, convirtiéndose en la más severa y duradera de todo el período de análisis 1978-2015. Los períodos húmedos sobresalientes son: de octubre de 1982 a julio de 1985, con valores de PDSI superiores a 4,0 en la mayoría de los meses del período, considerados de humedad extrema, el valor máximo fue el de PDSI= 8,3 ocurrido durante el mes de marzo de 1985; de diciembre de 1990 a marzo de 1992, con un valor pico PDSI=9,9 ocurrido en el mes de abril de 1992, siendo el valor más extremo del índice presentado aquí hasta el momento; de junio 2009 a marzo de 2010 con valores máximos del PDSI= 3,1 en fase de humedad excesiva y finalmente el período de abril a diciembre de 2015, con valores máximos del PDSI=3,8, considerándose período de humedad excesiva.

## Índice NDVI

Se presentan los resultados del NDVI para el período 2000-2015, de las estaciones Culiacán, Sanalona, Vorejonal, Huites, Bacurato, Comedero, Mazatlán, Durango, Chalchihuites, Acajoneta y Guamúchil, extraídos de las imágenes satelitales MODIS, mediante el programa IDRISI. Como ejemplo, en la Figura 3.7 se muestran los resultados de la estación Sanalona.

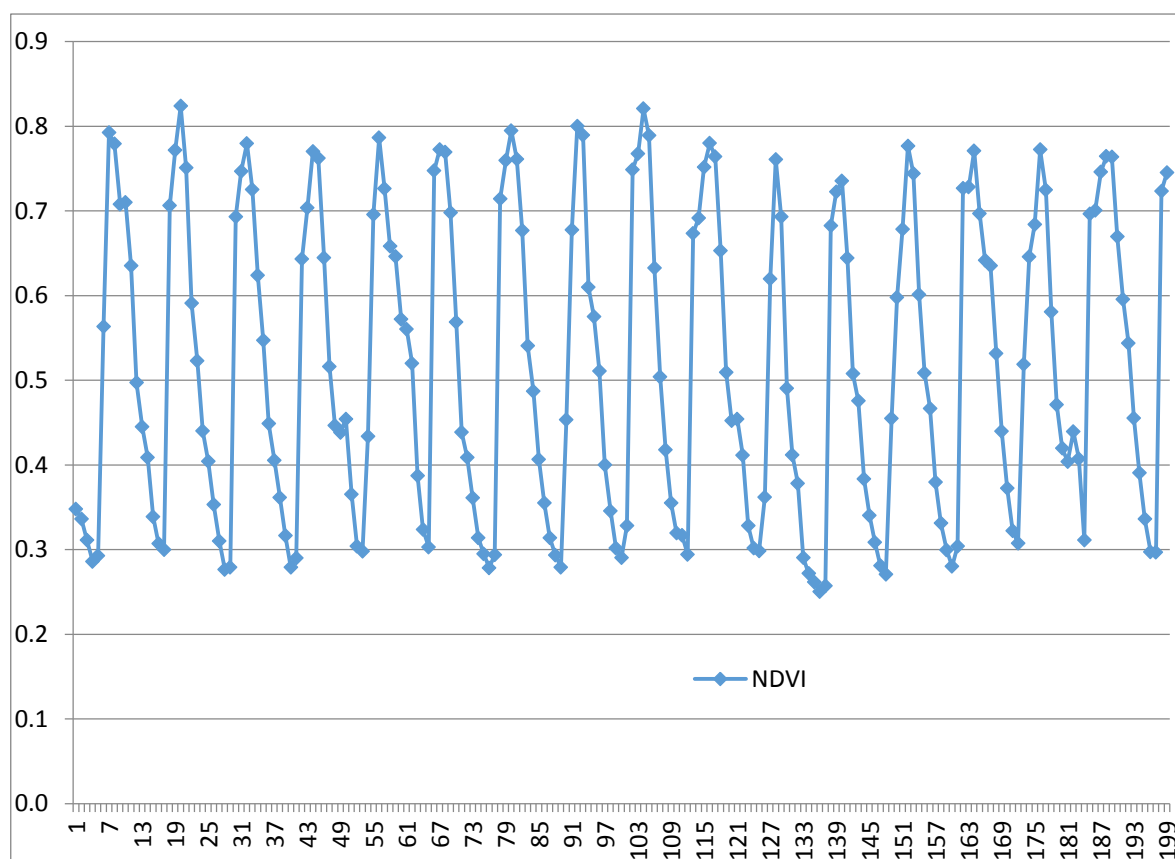


Figura 3.7. Variación temporal del NDVI en la estación Sanalona, período 2000-2015.

En la Figura 3.7 se ilustra la variación histórica del NDVI mensual en la estación Sanalona, para el período 2000-2015. En el eje vertical están los valores de NDVI, que fluctúan entre su valor mínimo  $NDVI_{min}=0,250$  y su valor máximo  $NDVI_{max}=0,824$ , su valor medio es  $NDVI_{med}=0,518$ . Los valores más pequeños ocurren en el mes de mayo (en la temporada de estiaje) y los más altos entre los meses de agosto y septiembre (depende del año) que son de mayor humedad debido a que agosto es el mes de mayor

lluvia y septiembre es cuando prácticamente finaliza la temporada de la lluvia de verano y se presentan el mayor efecto de los ciclones y su remanentes.

Con respecto a las diferencias del NDVI, estas fluctúan entre un valor negativo mínimo  $DIFNDVI = -0,267$  y un valor positivo máximo  $DIFNDVI = 0,306$ ; los valores negativos indican un déficit de humedad con respecto a su valor medio y los positivos un superávit de humedad con respecto al valor medio; este déficit puede ser producido por la presencia de una sequía o en caso contrario por eventos hidrometeorológicos húmedos.

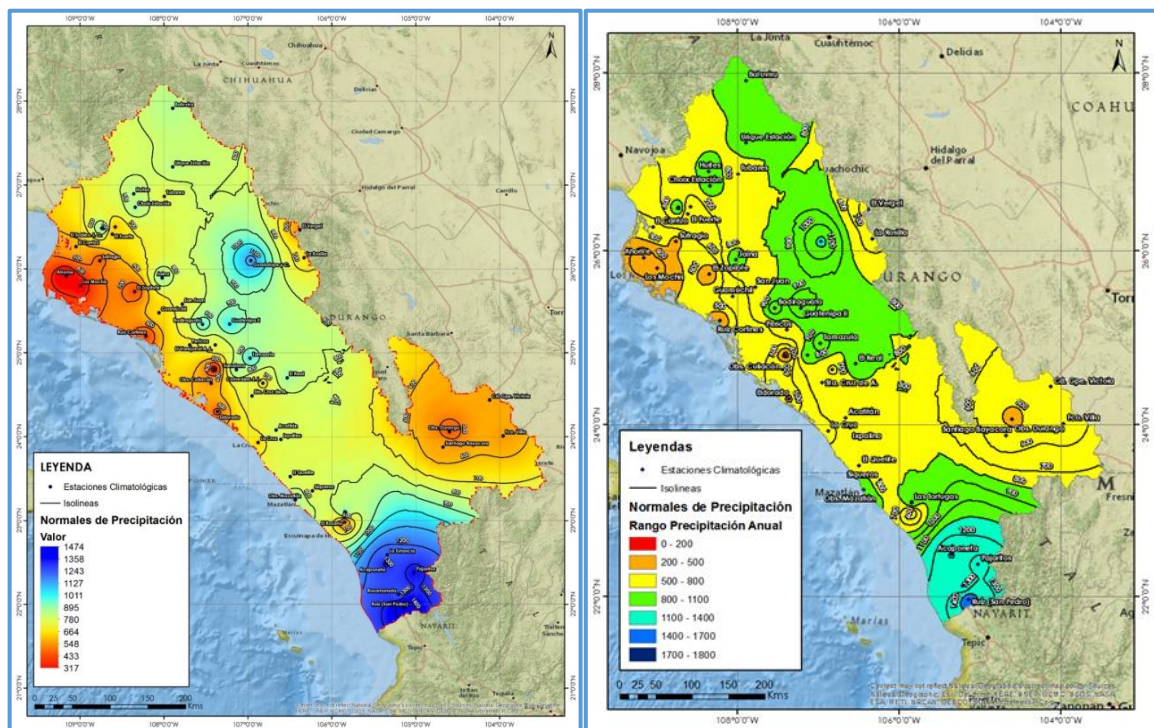
### **Variabilidad espacial de la sequía meteorológica**

En esta sección se analizan los resultados de la variabilidad espacial de la sequía meteorológica mediante las anomalías de precipitación y los índices SPI, PDSI y NDVI, conforme a la metodología propuesta en el capítulo anterior. Para ello se han seleccionado algunos meses representativos de períodos secos, normales y húmedos resultantes del análisis temporal de la sequía en la sección anterior y de acuerdo a las referencias históricas.

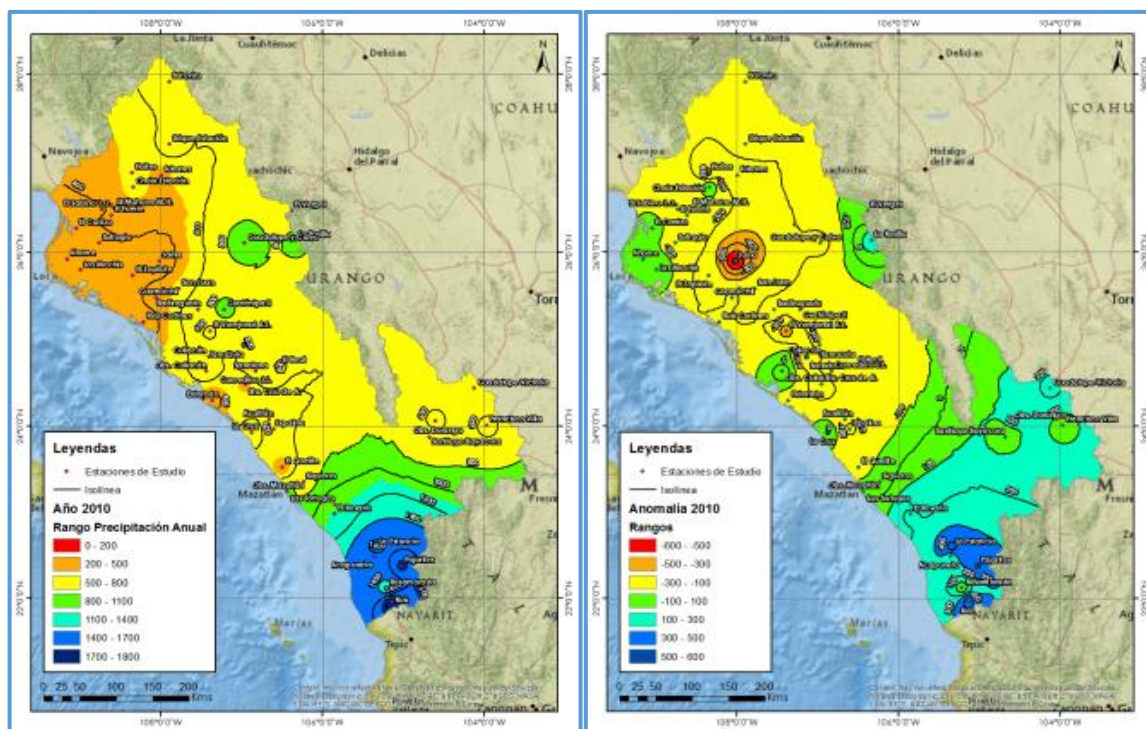
### **ANOMALÍAS ESPACIALES DE PRECIPITACIÓN**

Las anomalías espaciales se obtuvieron para cada año en particular mediante la diferencia de las Isoyetas de ese año con respecto a las Normales Climatológicas de Precipitación (NCP). Solo se analiza el período reciente 2010-2015, el cual incluye años con sequía, normales y húmedos; debido a que en estos últimos años se han presentado cuatro eventos extremos cuyo análisis es motivo de este trabajo, los años secos en el período de 2010-2012 y los años húmedos fueron 2013 (cuando ocurrió el huracán Manuel), 2015 (con la presencia del fenómeno El Niño) y 2016 (con el desarrollo del Monzon Mexicano). Además dentro de este período se presentan los dos eventos extremos opuestos en lo que a humedad se refiere, sobresaliendo los años 2011 por la presencia de la sequía y la helada más intensas de los últimos año en el OCPN y 2015, por la presencia de El Niño.

En la Figura 3.8, se ilustra el comportamiento de los valores normales de precipitación acumulada anual en el OCPN, en su variabilidad espacial Normal y por clasificación en rangos de valores de 200 mm. En la Figura 3.9, se ilustran las isoyetas de un año normal con sequía incipiente (2010) y sus anomalías; en la Figura 3.10, se ilustran las isoyetas de un año con una de las sequías más intensas de los últimos tiempo (2011) y sus anomalías; en la Figura 3.11, se ilustran las isoyetas de un año con sequía meteorológica e hidrológica reciente (2012) y sus anomalías; en la Figura 3.12, se ilustran las isoyetas de un año con sequía (2013) con la presencia del huracán Manuel y sus anomalías; En la Figura 3.13 se ilustran las isoyetas de un año normal a húmedo (2014) y sus anomalías; y en la Figura 3.14, se ilustran las isoyetas de un año húmedo reciente con la presencia incipiente del fenómeno El Niño (2015) y sus anomalías con respecto a las normales climatológicas de precipitación acumulada anual del período 1978-2015.



Figuras 3.8. Isoyetas de: a) Normales de precipitación y b) por clasificación en rangos de 200 mm de precipitación.



Figuras 3.9. Isoyetas de: a) Un año con sequía incipiente (2010) y b) sus anomalías de precipitación.

En los mapas de isoyetas del año 2010 y sus anomalías, se ilustra que las lluvias acumuladas anual disminuyeron notablemente en la parte centro-norte del OCPN; las principales anomalías se dieron en la parte media de los Ríos Fuerte y Sinaloa al pie de la sierra madre occidental, con disminución de lluvia entre los 300 mm y 600 mm; en el resto de la zona afectada (más del 60%) las anomalías negativas fluctuaron entre -100 mm a -300 mm. En la parte centro-sur del territorio se tuvieron precipitaciones cercanas a la normal con anomalías dentro del rango de -100 mm a 100 mm. Solamente hubo valores puntuales notablemente por encima de su normal de precipitación en la zona sur del Organismo: en la parte sur del estado de Sinaloa, parte norte del estado de Nayarit y en la parte Oeste del estado de Durango. Este notable déficit de lluvia confirma la presencia en el OCPN del inicio de una sequía meteorológica intensa y extensa, quizás de las peores de los últimos tiempos que ha azotado a México, concordando con Sanz *et al.* (2012; Ravelo *et al.* (2014) y Arreguín *et al.* (2016).

De acuerdo a los registros históricos de precipitación acumulada anual de todas las estaciones existentes en el OCPN, esta sequía inicio lentamente en el año 2010, y continuo

durante 2011 y 2012. En este período extendido de tiempo con déficit de precipitaciones principalmente en la Sierra Madre Occidental, que es la parte alta del OCPN, originó la ocurrencia de sequías hidrológicas en todas cuencas de este territorio, en especial las de la Región Hidrológica No. 10, que es donde están la mayor parte de las grandes presas del Organismo y cuyas cuencas de captación nacen precisamente en la Sierra Madre.

En la Figura 3.10 se ilustran las isoyetas del año 2011, cuando además de las sequías, se presentaron heladas y sequías (sequía meteorológica e hidrológicas inducida y natural) y sus anomalías; se observa que las lluvias acumuladas anual disminuyeron de manera importante en todo el OCPN a excepción de su parte sur, en la parte baja de la RH11. Toda la RH10 sufrió disminuciones drásticas en su precipitación acumulada anual (PAA), siendo notables e importantes las presentadas en la Sierra Madre Occidental, en los estados de Chihuahua y Durango, precisamente en las cuencas de captación de las presas Huites, Miguel Hidalgo, Bacurato, Eustaquio Buelna, Humaya, Tamazula y Comedero.

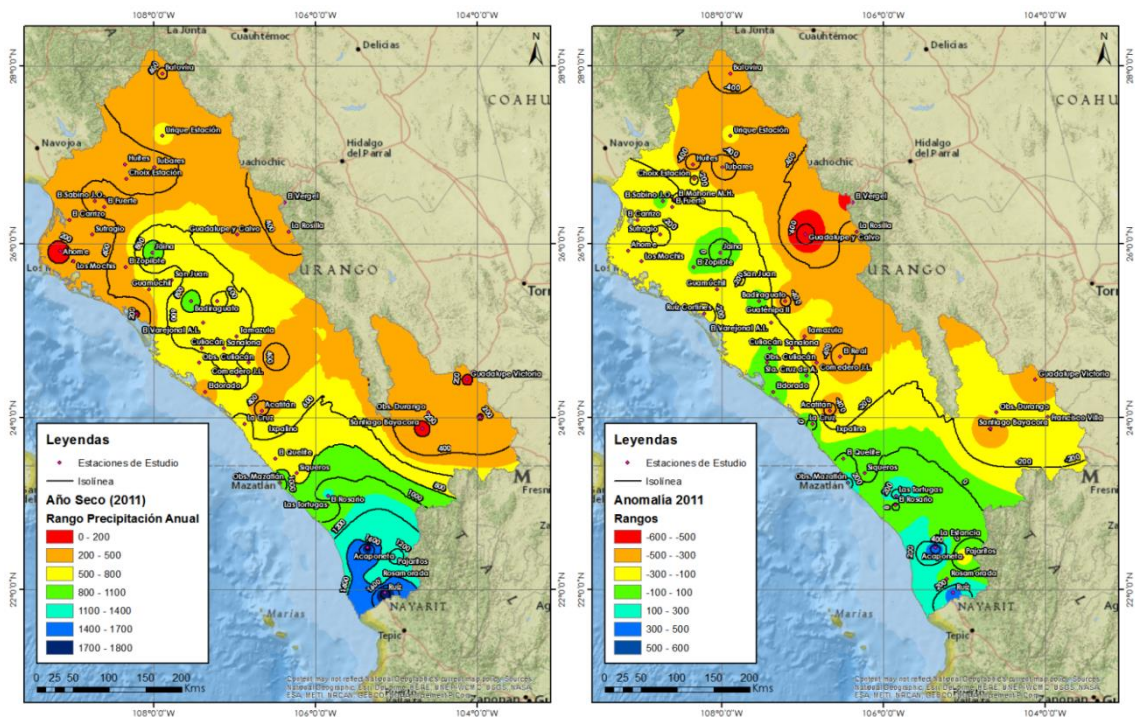


Figura 3.10. Isoyetas de: a) un año con sequía muy intensa y presencia de helada al principios del mes de febrero (2011) y b) sus anomalías.



En la zona norte del OCPN en todas sus altitudes y en la cuenca del Río San Pedro los valores de precipitación estuvieron por debajo de los 500 mm, con valores extremos de menos de 200 mm en la zona de las ciudades de Los Mochis en el Norte de Sinaloa y Victoria de Durango en Durango; las anomalías negativas de la PAA fueron superiores a 100 mm en más del 80% del área del OCPN. En este caso, más del 40% fluctuaron entre -300 mm a -100 mm y más del 35% entre -300 y -500 mm; y en menos de un 3% entre -500 y -600 mm.

En la Figura 3.11 se muestran los mapas de isoyetas del año 2012 y sus anomalías, donde se ilustra que las lluvias acumuladas anual disminuyeron notablemente; las principales anomalías se dieron en la parte de la sierra madre occidental con disminución de lluvia entre los 300 mm y 100 mm; hubo zonas más extremas como en Guadalupe y Calvo y en vergel en el estado de Chihuahua, estas anomalías cubrieron más del 60% del territorio del OCPN. El resto del territorio tuvo precipitaciones cercanas a la normal dentro del rango de los 100 mm y solamente hubo valores puntuales notablemente por encima de su normal de precipitación en El Zopilote y en El Rosario, localizados en la parte norte y sur del estado de Sinaloa, respectivamente. Este notable déficit de lluvia confirma la presencia en el OCPN de una sequía meteorológica intensa y extensa, quizás de las peores de los últimos tiempos que ha azotado a México, concordando con (Sanz *et al.*, 2012; Ravelo *et al.*, 2014; Arreguín *et al.*, 2016).

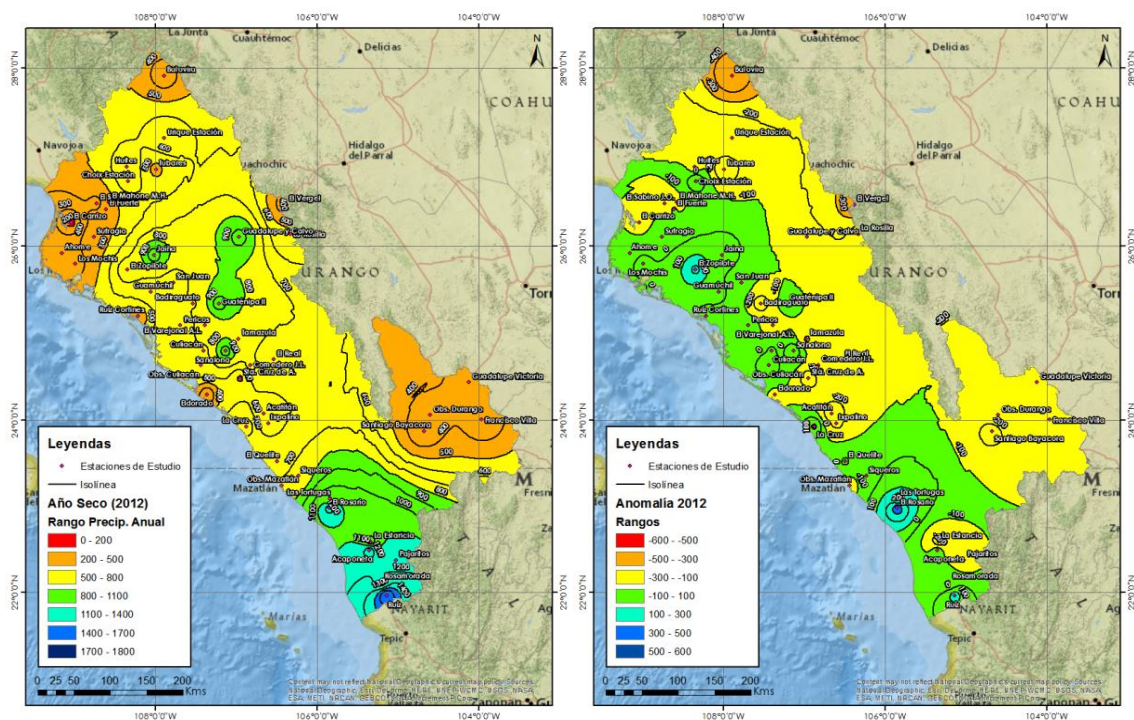


Figura 3.11. Isoyetas de: a) un año con sequía reciente (2012) y b) sus anomalías.

La Región Hidrológica No. 11 sufrió menos los efectos de la sequía (debido a que el déficit de lluvia fue menor que en la RH10) a excepción de la parte alta del río San Pedro, en donde se encuentra la ciudad de Victoria Durango en el estado de Durango. En esta RH11 solo se tiene una presa grande que es Picachos sobre el río Presidio y varias presas de mediano tamaño en la cuenca del río San Pedro.

Esta sequía meteorológica derivó en una sequía hidrológica natural que agravó la sequía hidrológica inducida en febrero del 2011, provocada por la disposición adelantada de los volúmenes de agua almacenadas en las presas para resembrar más de 400.000 has que fueron siniestradas por la helada del 4 de febrero de 2011.

En conclusión, se puede afirmar que las reducciones drásticas en la PAA produjeron unas de las sequías meteorológicas históricas más severas en el año 2011 que, combinándose con la helada inusual del mes de febrero, indujo una sequía hidrológica, generaron sequía hidrológica natural en dicho año, las cuales se fueron agravando con la persistencia de la sequía meteorológica en el año 2012; ambas sequías, la meteorológica e

hidrológica se convirtieron en una de las sequías más intensas que han afectado al OCPN, constatando que en el período de los años 2011-2012 se presentó en México la sequía más intensa de los últimos 70 años (Arreguin et al., 2016).

En la Figura 3.12 se ilustran las isoyetas de un año inicialmente con sequía y mitigado parcialmente por la presencia del huracán Manuel (2013) y sus anomalías con respecto a las normales climatológicas de precipitación acumulada anual del período 1978-2015.

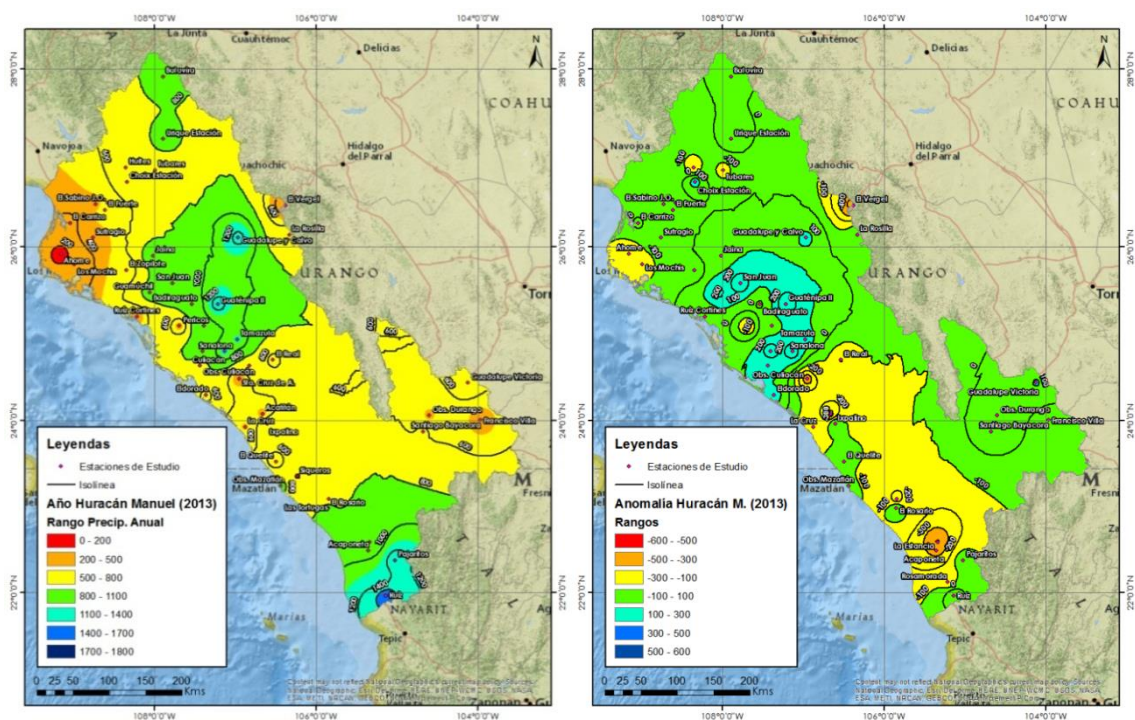


Figura 3.12. Isoyetas de: a) un año inicialmente seco con la presencia del huracán Manuel (2013) y b) sus anomalías.

En los mapas de isoyetas del año 2013 y sus anomalías, se ilustra que cuando se presentó el huracán Manuel en septiembre de 2013 el OCPN estaba en sequía y solamente mitigó la zona de influencia de donde impactó, que fueron las cuencas de los ríos Culiacán, Humaya, Tamazula y San Lorenzo; presentándose en las zonas medias y bajas de dichas cuencas altos incrementos de su PAA con anomalías positivas, fluctuantes entre los 100 y 300 mm (en forma de herradura de color azul). Finalmente, el año terminó con valores de la PAA muy cercanos a las Normales de precipitación en la mayor parte de territorio del Organismo, presentando déficit de precipitación en algunas pequeñas zonas de la RH10 y

en alrededor del 50% de la RH11 al sur del Organismo; solamente se presentó una anomalía severa en la zona de Acaponeta, Nayarit.

En la Figura 3.13, se ilustran las isoyetas de un año de normal a húmedo (2014) y sus anomalías con respecto a las normales climatológicas de precipitación acumulada anual del período 1978-2015.

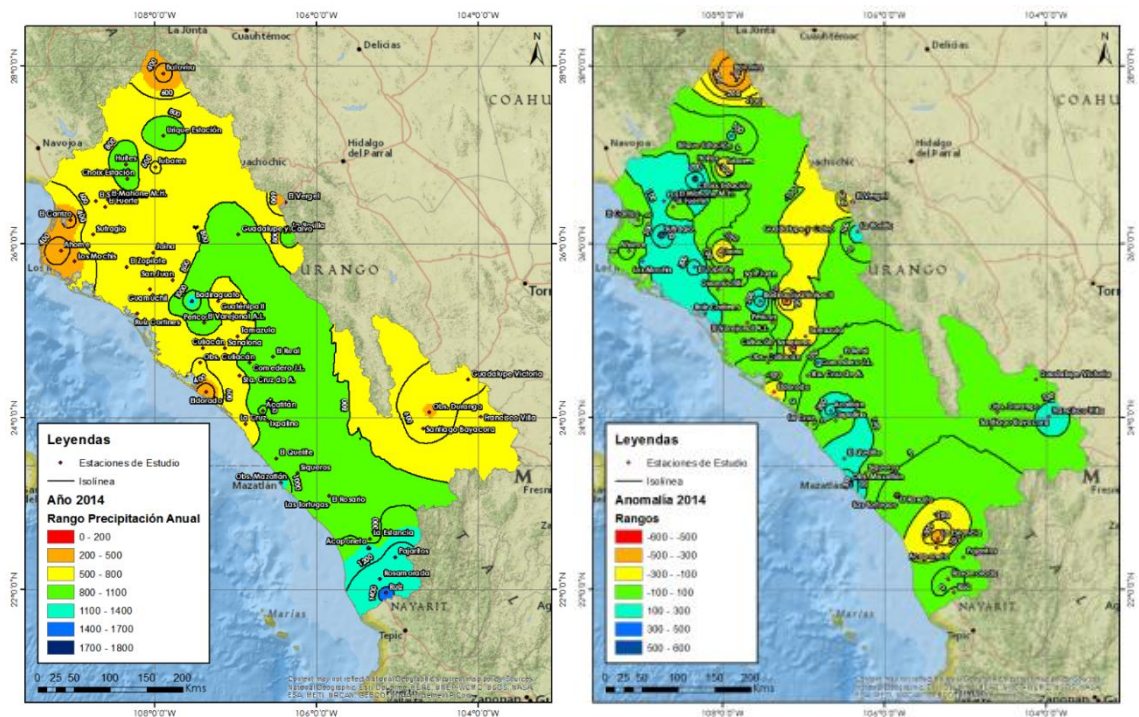


Figura 3.13. Isoyetas de: a) un año de normal a húmedo reciente (2014) y b) sus anomalías.

En los mapas de Isoyetas 2014, se observa que en más del 70% del territorio del OCPN las precipitaciones fueron normales, muy similares a las Normales de precipitación del período 1978-2015. Solamente en algunas zonas, principalmente en la parte noroeste, se presentaron anomalías de precipitación positivas que fluctúan entre 100 mm y 300 mm; y en algunas partes de la sierra madre occidental y la costa sur del OCPN se presentaron anomalías negativas entre -100 mm y -300 mm.

Finalmente, en la Figura 3.14, se ilustran las isoyetas de un año húmedo reciente con la presencia del fenómeno de El Niño y la activación del Monzón Mexicano (2015) y sus

anomalías con respecto a las normales climatológicas de precipitación acumulada anual del período 1978-2015.

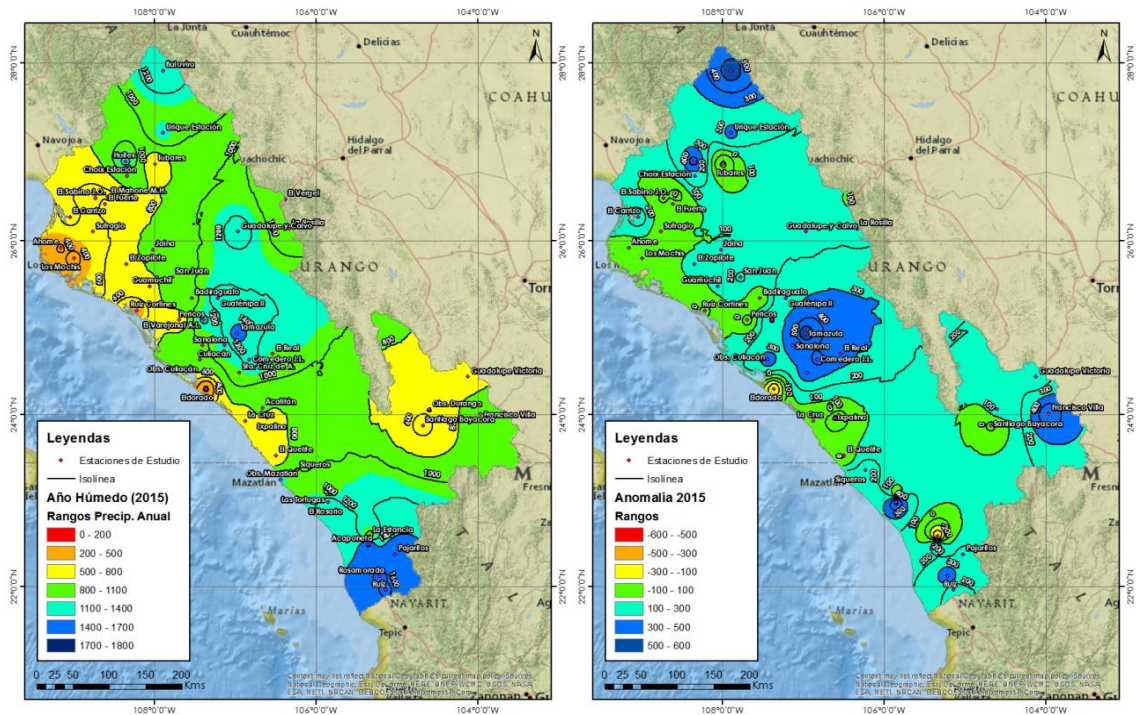


Figura 3.14. Isoyetas de: a) un año húmedo reciente (2015) con la presencia del fenómeno de El Niño y b) sus anomalías.

En los mapas de isoyetas del año 2015 y sus anomalías, se ilustra que las lluvias acumuladas anual aumentaron notablemente, los valores más pequeños fueron cerca de los 400 mm en la zona de Los Mochis y el Dorado, Sinaloa. Las precipitaciones más altas fueron en el sur del OCPN en la zona de Rosamorada y Ruíz en el estado de Nayarit, en donde se alcanzaron valores superiores a los 1600 mm; la zona Centro-Norte del OCPN también tuvo un aumento considerable en sus precipitaciones, con valores desde los 1200 mm hasta arriba de los 1400 mm en Tamazula, Durango; esta zona aporta a las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa, Mocerito, Humaya, Tamazula y San Lorenzo que son las cuencas en donde se encuentran las principales presas del Organismo.

Las principales anomalías se dieron en la parte de la sierra madre occidental, con aumentos de lluvia superiores a los 100 mm en un 80% del territorio; distribuido así: alrededor del 60% fluctuaron entre 100 mm y 300 mm, más del 15% entre 300 mm y 500

mm y menos del 5% entre 500 y 600 mm. Este notable aumento de lluvia confirma la presencia en el OCPN de los fenómenos de El Niño (Magaña, 2008; CONAGUA, 2015) y el Monzón Mexicano (SMN, 2016).

En conclusión, se puede afirmar que los incrementos notables en la PAA confirman la transición del período seco 2010-2013 a un período húmedo (2014) y a un período extraordinariamente húmedo (2015) por la presencia del fenómeno El Niño (CONAGUA, 2015) y el desarrollo del Monzón Mexicano (SMN, 2016).

### **VARIABILIDAD ESPACIAL DEL ÍNDICE SPI**

En esta sección se analiza el comportamiento espacial de la sequía a partir del SPI para las escalas de 1, 3, 6 y 12 meses y para meses de períodos secos, normales y húmedos de interés, dentro de la zona en estudio.

En la Figura 3.15 se ilustra el mapa de la variabilidad espacial del índice de precipitación estandarizada para tres meses (SPI3) en el OCPN para el mes de febrero de 2011, donde se presentó la helada histórica que afectó a mas de 800.000 has de cultivo (CONAGUA, 2012).

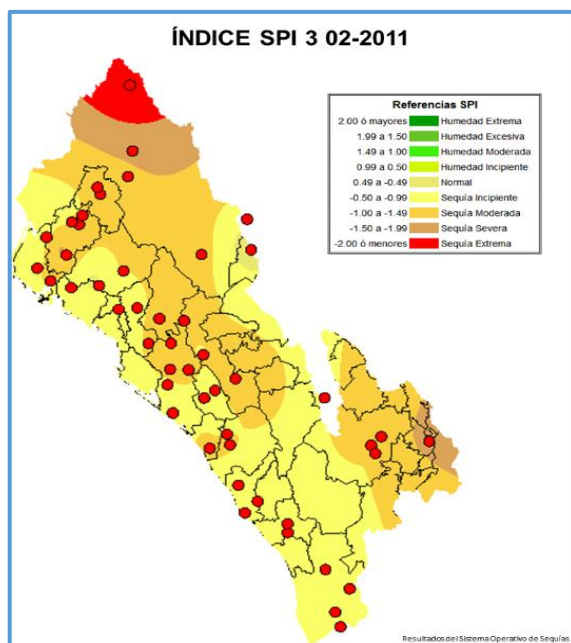


Figura 3.15. Mapa de la variabilidad espacial del índice SPI3 en febrero de 2011 en el OCPN. Los puntos rojos corresponden a las estaciones meteorológicas consideradas.

En la Figura 3.15 se observa que en febrero de 2011 todo el territorio se encuentra afectado por sequía en diferentes fases; la de mayor área es la de sequía incipiente (más del 50%), seguida por la sequía moderada (alrededor del 35%), en menor proporción la sequía severa (menos del 10%) y el resto en sequía extrema. Las áreas partes más afectadas son las cuencas del río Fuerte y Sinaloa en la parte de la Sierra Madre Occidental; como también en la cuenca alta del río San Pedro, en el estado de Durango. En la parte de los Distritos de Riego del OCPN la fase de sequía es de incipiente a moderada; que, sin embargo indujo sequía hidrológica en las presas a partir de ese mismo mes en razón del uso del agua por los usuarios (OCPN, 2012; Ravelo, 2012).

En la Figura 3.16 se ilustra la evolución de la sequía en la época de lluvias del año 2011, mediante el índice SPI3; analizando los meses de julio (a), agosto (b), septiembre (c) y octubre (d). En el mes de julio se tiene la presencia de sequía extrema en la parte norte del OCPN, sobre la sierra madre occidental, y en la parte sureste, en la cuenca del río San Pedro en el estado de Durango. La mayor extensión de sequía extrema se da en la cuenca del río Fuerte; en estas zonas también se tiene sequía severas, moderadas e incipiente, conforme se va de la sierra a la costa. En la mayor parte del territorio del OCPN

se registra una sequía de incipiente a moderada. Esta condición de sequía meteorológica en intensa y prolongada afecta directamente los recursos hídricos de la cuenca generando sequía hidrológica. Existen otras pequeñas zonas en el OCPN, con sequía extrema en la cuenca alta del río Culiacán y con humedad de incipiente a moderada en la línea de costa. En el mes de agosto la sequía extrema se incrementó notablemente en la Sierra Madre Occidental en las cuencas de los ríos Fuerte y Sinaloa, al norte del OCPN, y en la cuenca del río San Pedro en el estado de Durango. La pequeña zona de sequía extrema en la cuenca del río Culiacán se extendió a la cuenca del río San Lorenzo; y también las áreas con sequías severa y moderada crecieron disminuyendo la incipiente. Por otra parte aumentó la zona de humedad incipiente y moderada en la línea de costa de la parte centro al sur del OCPN, apareciendo zonas de humedad excesiva y extrema en la parte sur del OCPN. En el mes de septiembre la sequía extrema se extendió aun más en la sierra Madre Occidental sobre las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán, desapareciendo de la cuenca del río San Pedro en el estado de Durango. También creció la extensión de la sequía severa y moderada, disminuyendo la sequía incipiente y la condición de humedad en sus diferentes fases en la línea de costa. Finalmente, en el mes de septiembre se inicia una disminución de las sequías extremas y severas en la sierra Madre Occidental en las cuencas de los ríos Fuerte y Sinaloa y creciendo estas fases de sequías en la parte central del OCPN en las cuencas de los ríos Mocorito, Culiacán y San Lorenzo; la humedad en su fase extrema tiende a desaparecer y disminuye en sus fases de humedad excesiva y moderada.



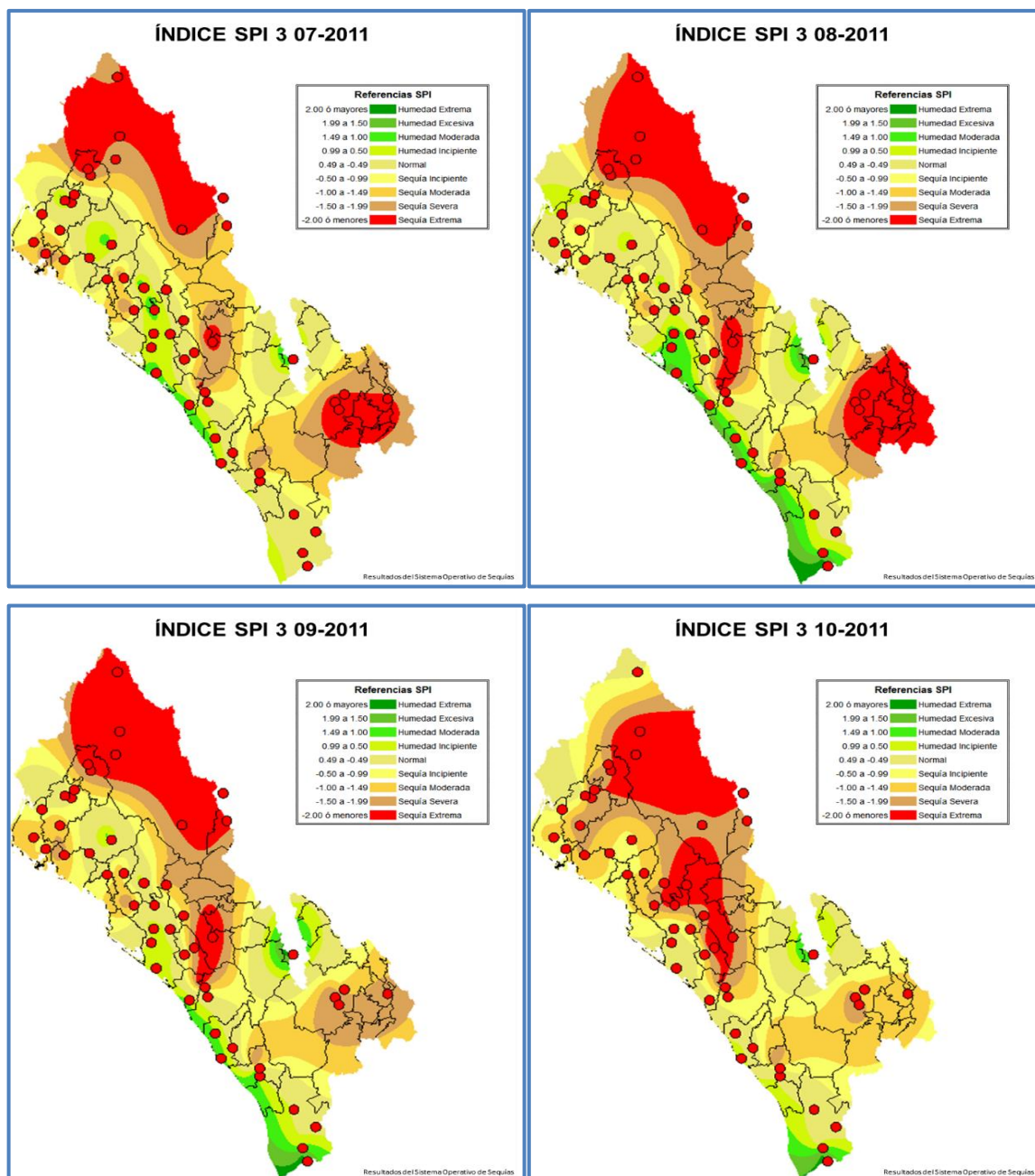
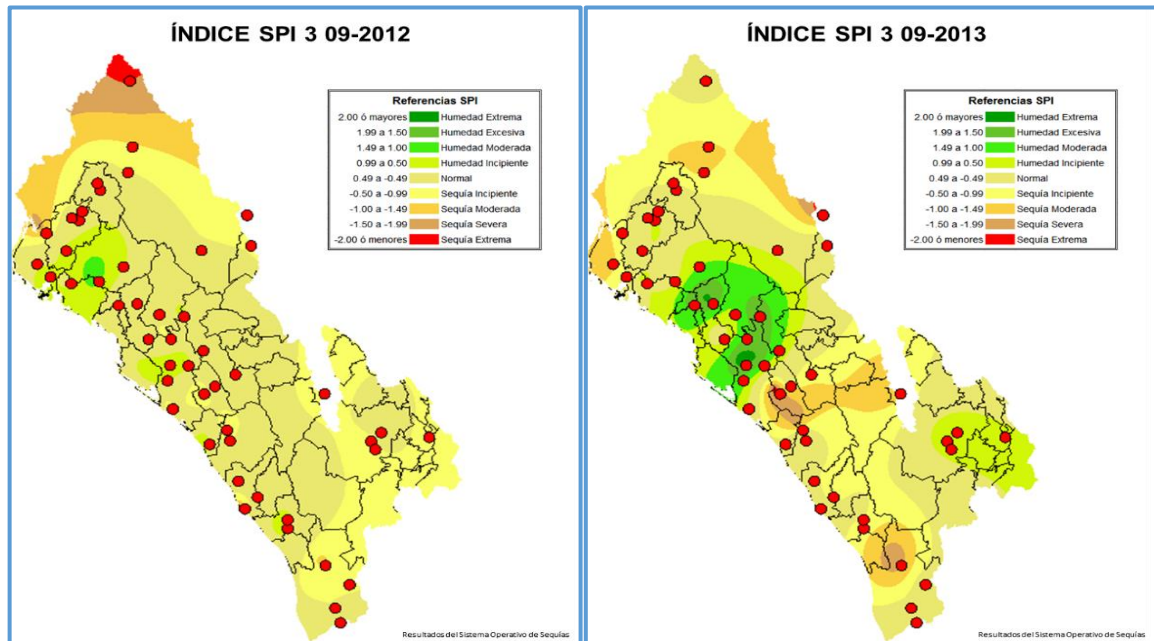


Figura 3.16.: Mapas de evolución de la sequía en el OCPN, durante el período julio-octubre de 2011; según el Índice de Precipitación Estandarizado de 3 meses (SPI3).

En la Figura 3.17 se muestra la evolución de la sequía para los meses de septiembre de los años 2012 a 2015. A lo largo del año 2012 practicamente todo el territorio se encontraba en normalidad, pero con sequía en sus fases de incipiente a Extrema en el norte de la RH10, y algunas pequeñas zonas con humedad incipiente y moderada en las partes bajas del OCPN. En el año 2013 se manifiesta claramente el efecto del huracán Manuel que produjo un fuerte impacto en las cuencas de los ríos Mocerito, Culiacán y San

Lorenzo, mostrando fases de humedad incipiente y moderada. En este mes, el OCPN se encontraba en condiciones de normalidad en menos del 40% de su territorio y en fases de sequía incipiente a severa en más de un 50% del territorio. En el año 2014, el mes de septiembre muestra normalidad hídrica, con algunas zonas de RH10 en la sierra Madre Occidental en sequía de incipiente a Extrema abarcando 20% del área del OCPN y zonas de humedad en sus fases de incipiente a extrema en más del 20% del territorio, principalmente en las zonas bajas de las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa, Mocorito y Culiacán. En el año 2015, el mes de septiembre se manifiesta como un año más húmedo, con normalidad hídrica en más del 50% del OCPN, con algunas pequeñas zonas con sequía incipiente y grandes áreas con fases de humedad de incipiente a excesiva, principalmente en la zona norte en los límites con el Organismo de Cuenca del Noroeste (OCN).



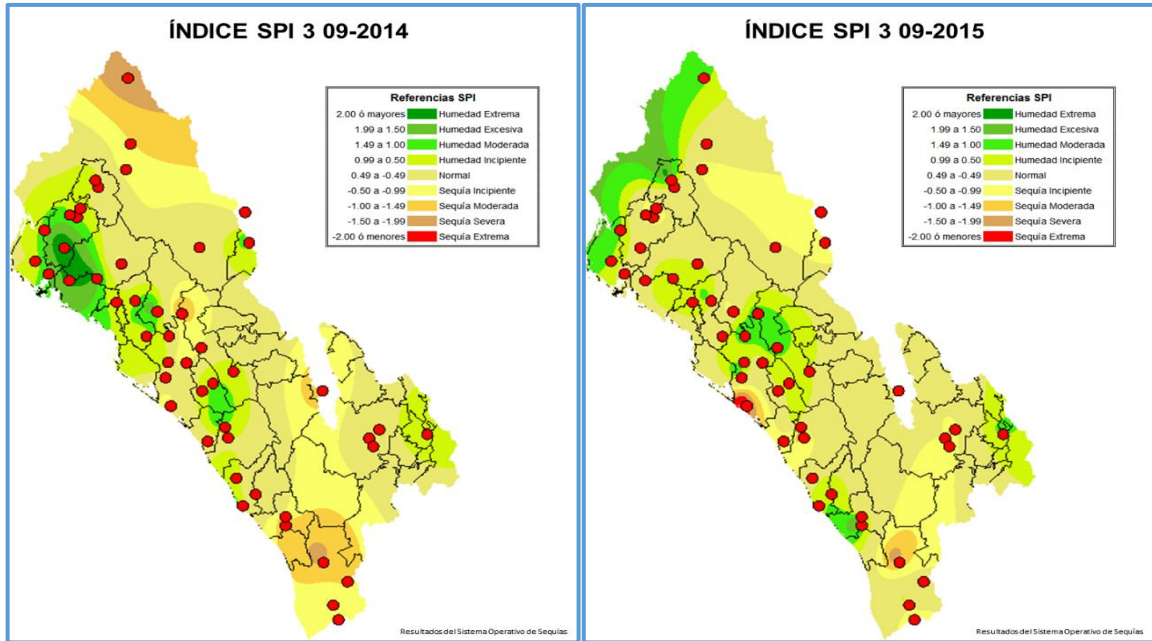


Figura 3.17. Mapas de evolución de la sequía en el OCPN, para el mes de septiembre en los años 2012, 2013, 2014 y 2015 estimado a partir del SPI3.

### VARIABILIDAD ESPACIAL DEL ÍNDICE PDSI

En esta sección se presenta el comportamiento espacial del PDSI mensual de períodos secos, normales y húmedos de interés, dentro de la zona en estudio.

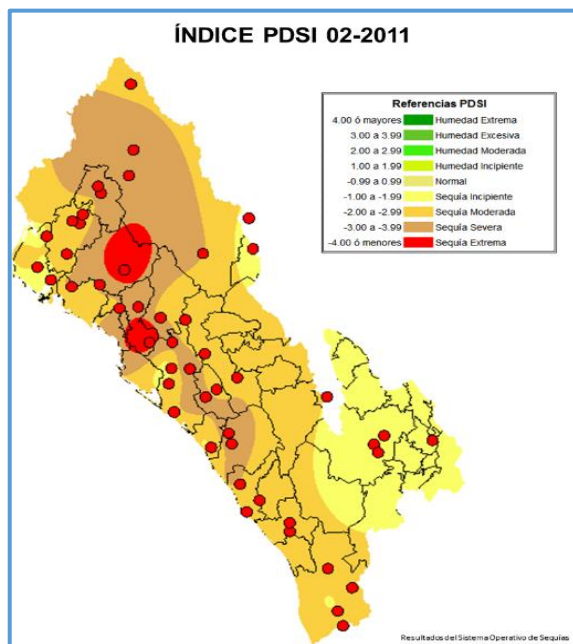


Figura 3.18. Mapa de la variabilidad espacial del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) en febrero de 2011 en el OCPN.

En la Figura 3.18 se observa que todo el territorio del OCPN se encuentra afectado por sequía en diferentes fases; siendo la de mayor área la que presenta sequía moderada (más del 50%), seguida de la sequía incipiente y severa (alrededor del 20% y 25%, respectivamente) y, en menor proporción, la sequía extrema (menos del 5%). Las áreas más afectadas por sequía moderada, severa y extrema son las cuencas del río Fuerte y Sinaloa en la parte de la Sierra Madre Occidental; en la cuenca alta del río San Pedro, en el estado de Durango, la sequía es incipiente. En la parte de los Distritos de Riego del OCPN las fases de la sequía va de moderada a extrema; que aunado a la resiembra de los cultivos afectados por la helada indujo sequía hidrológica en las presas a partir de ese mismo mes (OCPN, 2012; Ravelo, 2012).

En las Figuras 3.19 se ilustra la evolución de la sequía en la época de lluvias del año 2011, mediante el índice PDSI; analizando los meses de julio (a), agosto (b), septiembre (c) y octubre (d). En el mes de julio se tiene la presencia de sequía extrema en la zona norte del OCPN, sobre la sierra madre occidental, en la parte alta de las cuencas de los ríos Fuerte y Sinaloa, cubriendo un área equivalente al 15% del territorio del OCPN. La fase de sequía severa cubre una amplia extensión en las partes altas de la sierra Madre Occidental, en las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa, Culiacán, San Lorenzo, Elota, Piaxtla, Acaponeta y San Pedro y en la zona intermedia y baja de las cuencas ríos Sinaloa y Mocorito, con una extensión aproximada al 35%; en la línea de costa se tienen sequías moderadas e incipientes. En el mes de agosto la sequía extrema creció notablemente en la Sierra Madre Occidental en las cuencas de los ríos Fuerte y Sinaloa y aparece en la parte alta de las cuencas de los ríos Mocorito y Culiacán, sobre el centro norte del OCPN. Asimismo, también creció la sequía severa en la parte centro norte del OCPN y en la cuenca del río San Pedro en el estado de Durango; aparece humedad incipiente y moderada en la línea de costa de la parte centro al sur del OCPN, y zonas de humedad excesiva y extrema en la parte sur del OCPN. En el mes de septiembre la sequía extrema se extendió aun más en la sierra Madre Occidental en las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán, y apareciendo en la parte baja de los ríos Mocorito y Culiacán y en algunas partes bajas de las cuencas del sur del OCPN. También creció la extensión de la sequía severa, moderada e incipiente, disminuyendo notablemente las fases de la humedad en sus diferentes fases en la línea de costa, hasta prácticamente desaparecer. Finalmente, en el mes de octubre la

sequía extrema se ha extendido por practicamente toda la sierra Madre Occidental en la RH10 del OCPN y las partes bajas de las cuenca de los ríos Mocorito, Culiacán y San Lorenzo;asi como en la parte sur del OCPN en las cuencas de los ríos Presidio y Baluarte, abarcando una extensión mayor al 30% del OCPN; Tambien se incrementaros las fases de sequías severa y moderada, principalmente en la RH11, desapareciendo todo indicio de humedad.

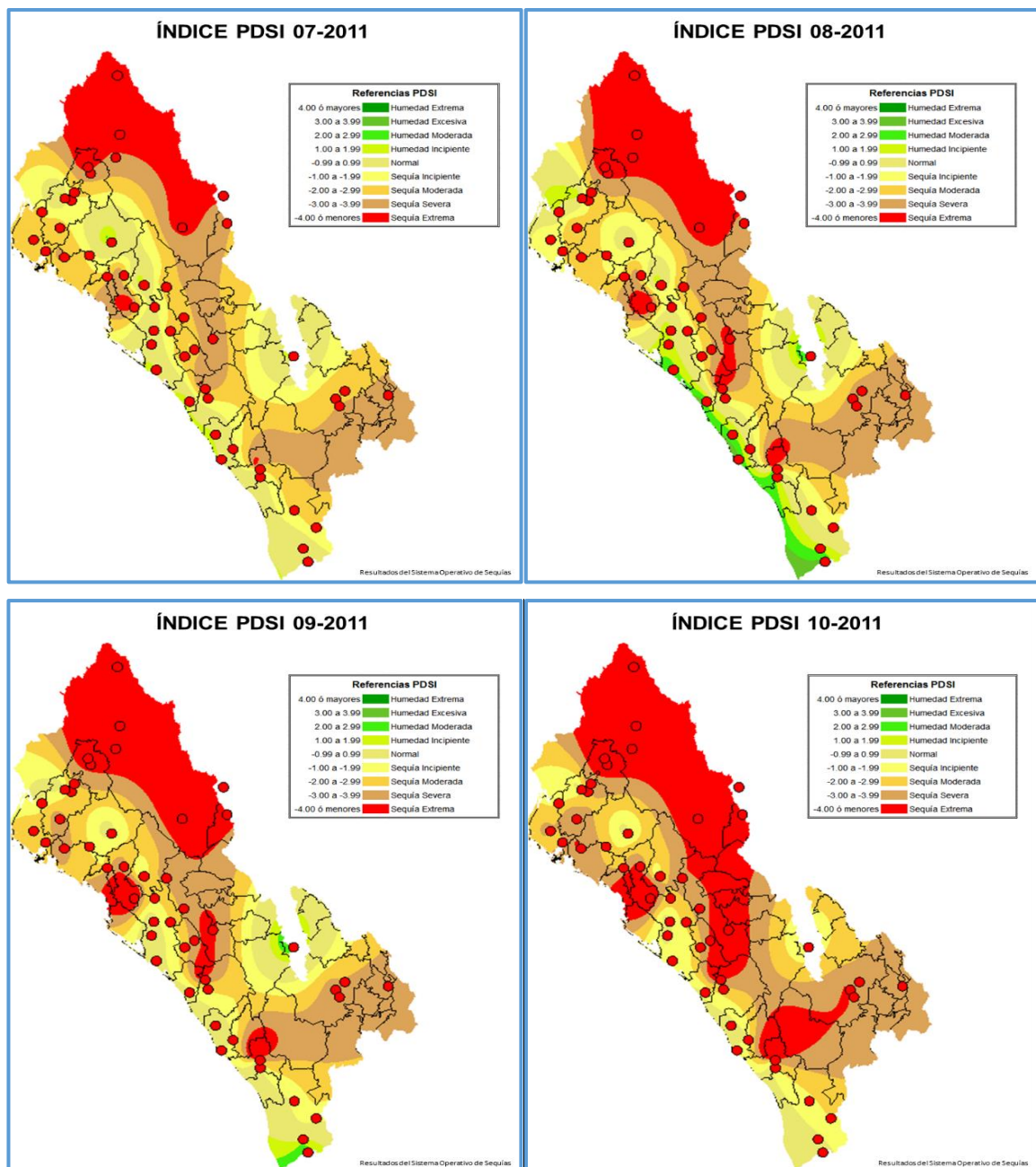


Figura 3.19. Mapas de evolución de la sequía del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) en el OCPN para el período julio-octubre de 2011.

En la Figura 3.20 se muestra la evolución de la sequía meteorológica mediante el índice PDSI para el mes de septiembre en el período 2012 al 2015. El mes de septiembre del año 2012 muestra el territorio del OCPN abarcando en su mayor parte (más del 70%) con sequías en diferentes fases, desde incipiente en las partes bajas de las cuencas hasta extrema en la sierra Madre Occidental en el norte del OCPN. En septiembre de 2013, se muestra claramente el impacto del huracán Manuel en las cuencas de los ríos Culiacán, Mocorito y San Lorenzo, dejando una zona en forma de herradura de humedad moderada y excesiva; que también impactó en la cuenca alta de los ríos fuerte y Sinaloa, disminuyendo la sequía de fase extrema a severa, y de severa a moderada. Solamente en la cuenca baja de los ríos San Lorenzo y Elota se presenta una zona pequeña con sequías en fases moderada, severa y extrema; mientras que en la RH11 también disminuyó la sequía de moderada a incipiente y alcanzando condiciones de normalidad hídrica. El mes de septiembre de 2014 se presenta más húmedo que los años anteriores, teniendo normalidad hídrica en la mayor parte del territorio del OCPN. La sequía disminuye sustancialmente presentándose en las fases incipiente, moderada y severa en la sierra Madre Occidental en la parte norte del OCPN y, en menor extensión, en la parte sur del OCPN. En cambio, se presentan fases de humedad de incipiente a extrema en la parte baja de las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Mocorito, y de incipiente a moderada en la cuenca media y baja de los ríos San Lorenzo, Elota, Piaxtla, Quérite y Presidio. Este año 2014 se muestra como la transición de un período seco (2010-2013) a otro húmedo (2014-2015). Definitivamente, el año 2015 fue más húmedo que los años anteriores (2010-2014), con presencia de humedad en las fases de incipiente a extrema en más del 50% del territorio del OCPN. Sin embargo, sequías extremas se presentaron en la parte norte del OCPN en colindancia con el OCNO, en la parte centro en las cuencas de los ríos Culiacán, San Lorenzo y Elota, y en la parte sur del OCPN en los estados de Durango, Zacatecas y Nayarit, en los municipios pertenecientes a la cuenca del río San Pedro.

La densidad de estaciones climatológicas utilizadas en este trabajo produjo un monitoreo y evolución de la sequía más certero que los producidos por los monitores de sequías de América del Norte (NADM, 2016) y el Monitor de sequías de México (SMN, 2016), que realizan el análisis a una escala mayor y utilizan menor cantidad de estaciones climatológicas. La precisión del monitoreo de la sequía a la escala utilizada en este trabajo,

permite estimar adecuadamente la vulnerabilidad y riesgo a la sequía en los municipios y cuencas que conforman el OCPN.

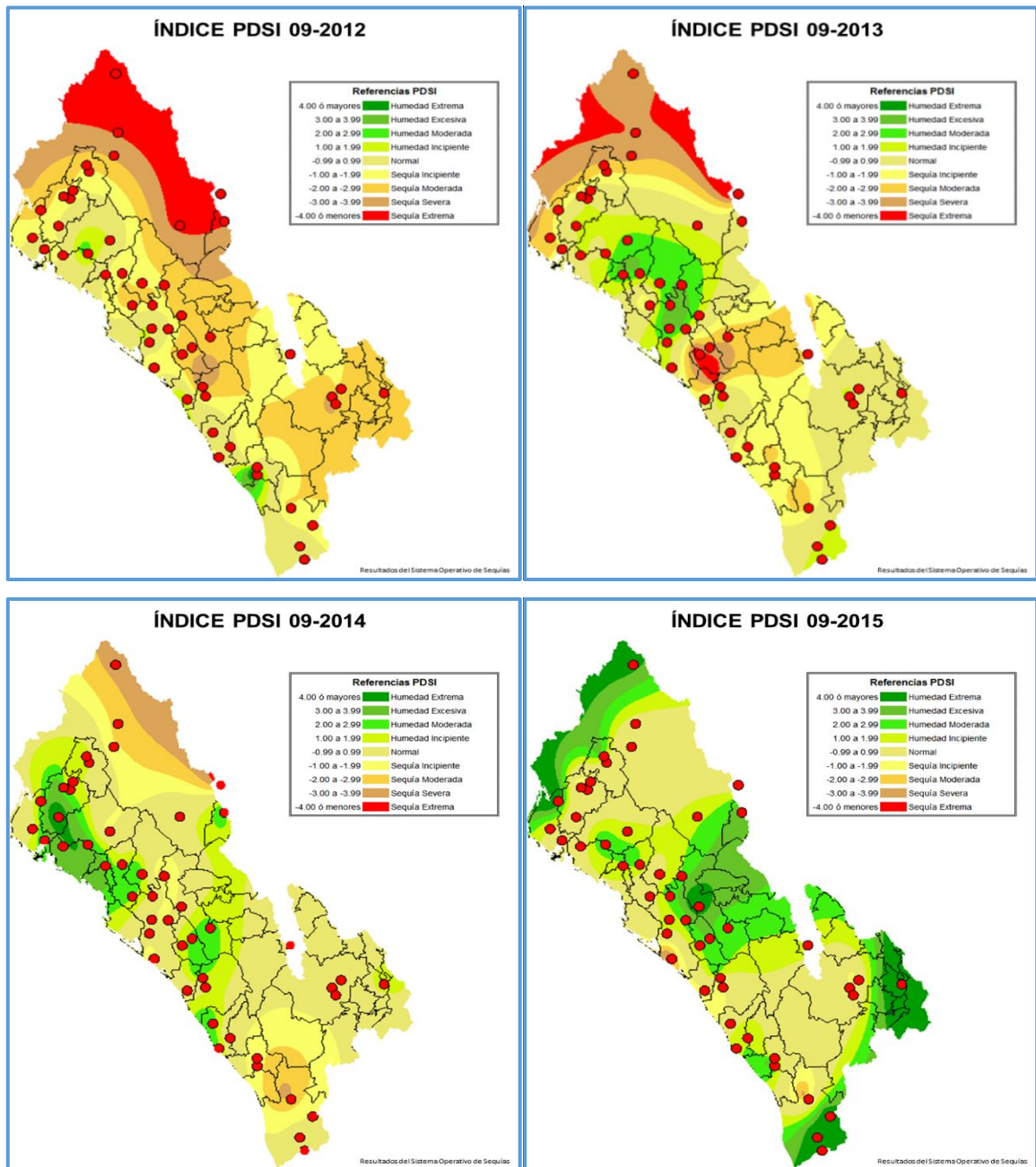


Figura 3.20. Mapas de evolución de la sequía en el OCPN, del mes de septiembre de los años 2012-2015, utilizando el Índice de Severidad de Sequía de Palmer PDSI.

## VARIABILIDAD ESPACIAL DEL ÍNDICE NDVI

En esta sección se presenta el comportamiento espacial del NDVI mensual, dentro de la zona en estudio, detallando períodos secos, normales y húmedos de interés.

En la Figura 3.21 se muestra la variabilidad espacial del NDVI medidas en Desviaciones Estándar y su asociación con las fases de sequía en el OCPN para los meses de septiembre de los años 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 y 2015, mostrando las variaciones del NDVI para condiciones normales (2010), con sequía (2011-2012), con sequía e influencia del huracán Manuel (2013), normal (2014) y húmedo (2015).

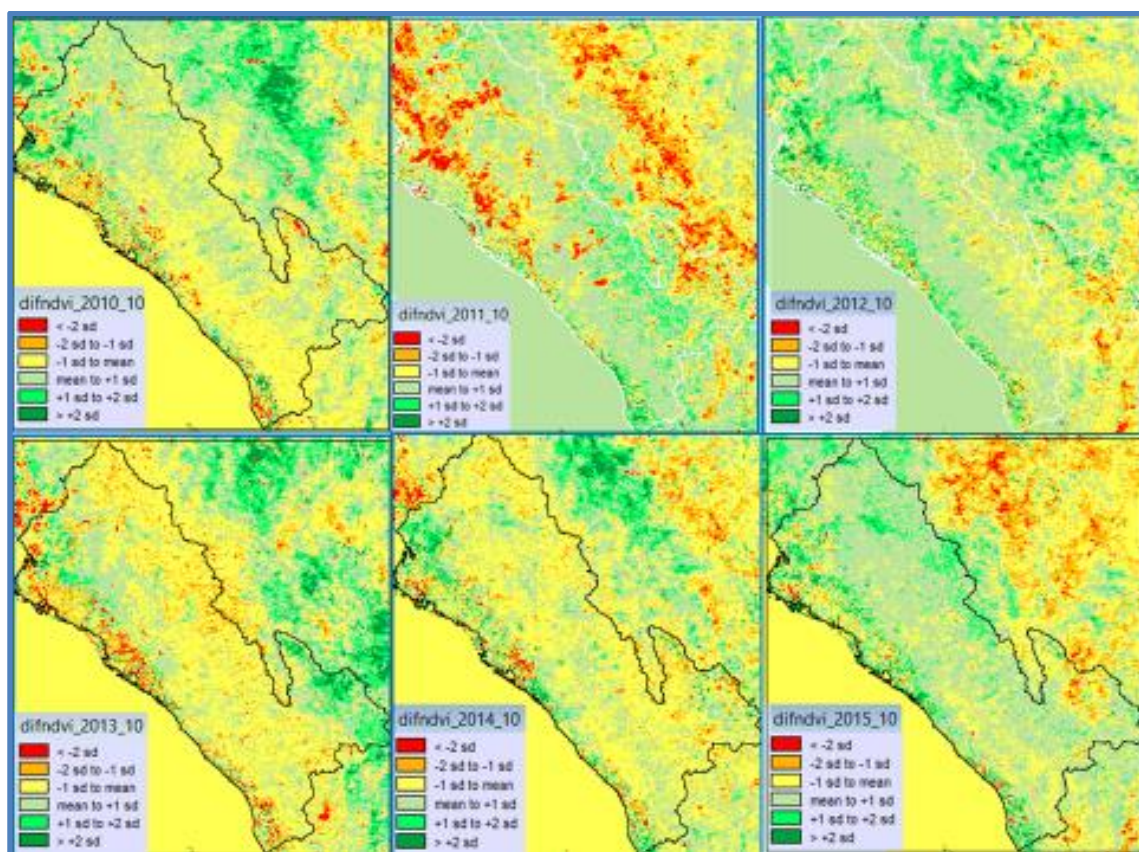


Figura 3.21: Variabilidad espacial de la sequía en el OCPN mediante el NDVI, correspondiente al mes de septiembre de los años: 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 y 2015.

En la figura se observan en el territorio del OCPN, para el primero de octubre del año 2010 condiciones de normalidad en prácticamente en toda la zona, con valores muy



puntuales de sequía en algunas áreas en parte centro-norte y el sur de la costa del estado de Sinaloa. Para la misma fecha en 2011, prácticamente todo el territorio se encuentra en diferentes fases de sequía (NADM, 2011, CONAGUA, 2011), desde incipiente hasta extrema. En el año 2012, la sequía meteorológica y agrícola habían desaparecido debido a las lluvias de verano en los meses de julio a septiembre, mostrando algunas áreas con fase de sequía incipiente a extrema en la parte alta del río San Pedro y de condiciones de humedad, en otras áreas, no obstante para entonces se tenía sequía hidrológica en la mayor parte del OCPN, principalmente en la RH10 (Ravelo, 2014; Sanz, 2012). Para el año 2013, que es considerado uno de los más secos hasta el mes de septiembre, que fue cuando se presentó el huracán Manuel, el NDVI muestra al territorio del OCPN con normalidad hídrica y condiciones de humedad incipiente a moderada en la zona de las cuencas de los ríos Culiacán, Mocorito y San Lorenzo, donde impactó el huracán Manuel, y en la parte alta del río San Pedro en el estado de Durango, más que el resto del territorio muestra condiciones de sequía en fases de incipiente a extrema. En el año 2014, la mayor parte del OCPN se encuentra en condiciones de normalidad hídrica, con pequeñas áreas de sequía incipiente y humedad incipiente. Finalmente, en el año 2015, bajo la influencia del fenómeno El Niño y del Monzón Mexicano (SMN, 2016), para el 01 de octubre el NDVI muestra condiciones de normalidad hídrica en la mayor parte del OCPN, con humedad incipiente en partes de la Sierra Madre Occidental y línea de costa. Sólo se presentan algunas pequeñas áreas con sequía incipiente en línea de costa en la parte centro norte y fases de sequía incipiente a Severa en pequeñas áreas de la cuenca del río San Pedro en el estado de Durango.

Los resultados obtenidos a partir del NDVI mensual en su clasificación en Desviaciones Estándares lo manifiestan como un buen indicador en lo general del comportamiento de la sequía en cualquier parte del OCPN; aun sin embargo, no es posible compararlo con los resultados de los indicadores PDSI y SPI3, debido a que estos últimos tienen una clasificación de las fases de sequía y humedad diferentes. Como un intento de subsanar este inconveniente se creó la clasificación y paleta de colores que se indica en la Figura 3.22, en donde los colores amarillo y verde claro indican normalidad hídrica, y los colores naranja, rojo y negro se asocian con las fases de sequía moderada, severa y extrema, respectivamente; en contraparte, los colores verde limón, verde oscuro y azul

marino se asocian con categorías moderadamente húmedo, muy húmedo y extremadamente húmedo, respectivamente. El color azul celeste representa al agua, tanto salada (mar) como dulce (presas y bordos). Como un ejemplo, se muestran los resultados de la variabilidad espacial NDVI correspondiente al primero de marzo de 2011 que representa las condiciones hídricas y su asociación con las fases de sequía del mes de febrero de 2011, cuando se presentó la helada más intensa de la historia reciente en el territorio del OCPN, que afectó a más de 800.000 has de cultivo.

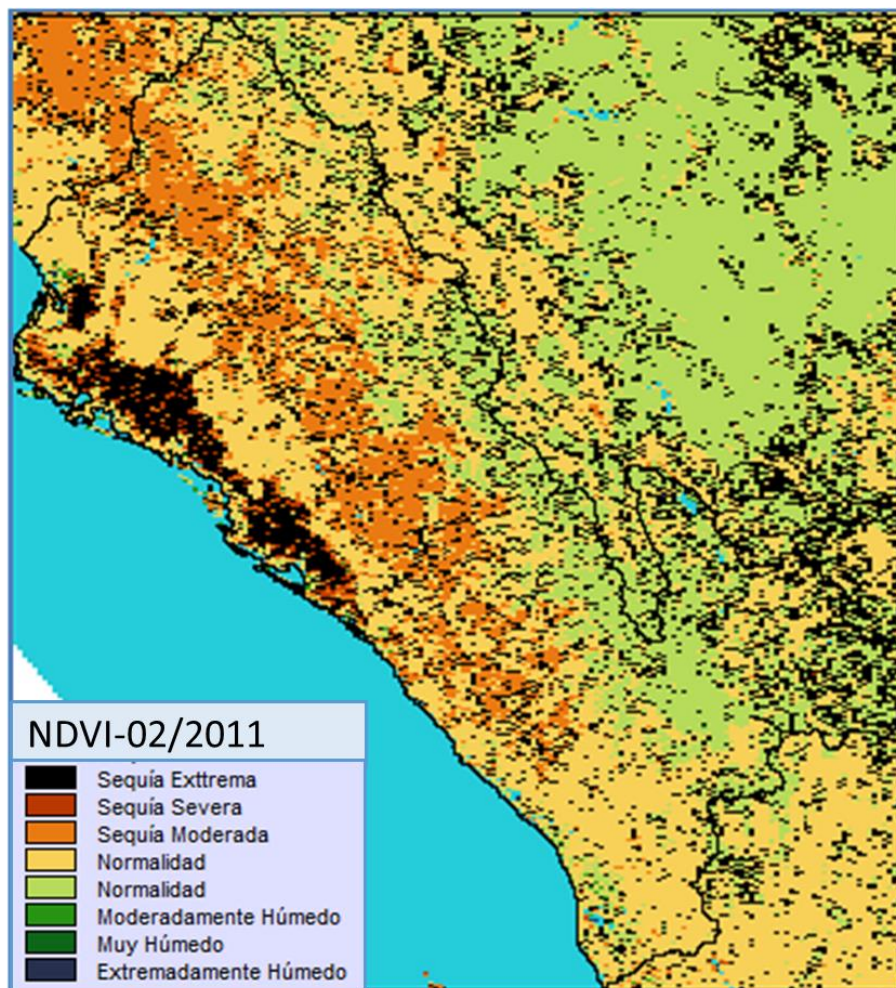


Figura 3.22. Variabilidad espacial de la sequía en el OCPN mediante el NDVI, en febrero de 2011.

En la figura se observan condiciones de normalidad y de sequía moderada en la mayor parte del territorio, principalmente en la zona de la Sierra Madre Occidental. En cambio, en la zona de costa de la RH10 se muestran valores correspondientes a sequía extrema que, en

realidad, muestra los daños provocados por la helada intensa a los cultivos y vegetación nativa en las áreas de los Distritos de Riego 010, 064, 075 y 076, en el estado de Sinaloa. El índice PDSI para ese mes indica condiciones de sequía moderada a severa con algunas pequeñas áreas de sequía extrema en esa zona (Figura 3.18) y el índice SPI3 señala condiciones de sequía incipiente a moderada para esa misma zona.

El monitoreo de las sequías meteorológicas en el OCPN mediante los índices SPI a diferentes escalas de tiempo, PDSI y NDVI a escala de cuenca, permiten una mejor aproximación que los resultados arrojados por los monitores: Monitor de Sequías de América del Norte (NADM, 2015), por el Monitor de Mexicano de Sequías (SMN, 2015) y el Monitor de Sequías Mexicano (CONAGUA, 2016), debido a que estos últimos utilizan una escala espacial mayor y una menor densidad de estaciones climatológicas, lo que le genera menor precisión en su estimación. Más bien, los monitores de escala local complementan a estos monitores de macroescala.

## **MONITOREO DE SEQUÍAS HIDROLÓGICAS**

En esta sección se describe el monitoreo de sequías hidrológicas, utilizando los índices de Esguerrimiento (SDI) y del Estado de las presas (Ie), de las principales corrientes y embalses existentes en el OCPN, los inicios de cada período son diferentes, dependen de cuando entro en operación la estación hidrométrica o la presa en análisis, pero se acotaron todos los registros al termino del año 2015.

### **Valores normales de esguerrimiento en el OCPN**

En este apartado se describen las normales de esguerrimiento mensual de algunas de las principales corrientes y embalses del OCPN, las cuales se estimaron a partir de sus registros históricos para el período 1978-2015.

En la Figura 3.23, como ejemplo se describe el comportamiento histórico de los volúmenes de esguerrimiento mensual para las estaciones hidrométricas localizadas en los

puntos de ingreso de aguas superficiales a las presas Sanalona (Sanalona, 1948-2015), Adolfo López Mateos (Varejonal, 1939-2015) y Luis Donaldo Colosio (Huites, 1949-2015).

Tanto en las matrices de valores de escurrimiento mensual y anual como en la Figura 3.23, se observan años muy húmedos (1958, 1981, 1991, 1996, 2013 y 2015) y muy secos (1951, 1957, 1969, 1975-1977, 1979, 1982, 1987, 1994-1995, 1997-2003, 2005-2007, 2009-2012), en el caso de la estación Sanalona.

Para el caso de la estación El Varejonal, los años muy húmedos fueron 1943, 1958, 1966, 1981, 1992, 1996, 2004, 2008 y 2013 y los muy secos ocurrieron en 1944-1947, 1951-1953, 1956-1957, 1965, 1969-1970, 1975, 1977, 1982, 1987, 1994-1995, 1997-1999, 2001-2002, 2009-2012.

Finalmente, en la estación Huites: los años muy húmedos (1949, 1966, 1968, 1973, 1981, 1984, 1990, 1991, 2008 y 2014) y muy secos (1951, 1953, 1956-1957, 1965, 1969, 1982, 1987, 1995, 1998, 2002-2003, 2011-2012).

El escurrimiento medio anual es la estación Sanalona para el período 1948-2015 es de 779,03 hm<sup>3</sup>; los años más secos fueron 1951 (354,39 hm<sup>3</sup>), 1957 (266,53 hm<sup>3</sup>), 1982 (265,93 hm<sup>3</sup>), 1998 (377,90 hm<sup>3</sup>), 2002 (382,45 hm<sup>3</sup>), 2009 (357,44 hm<sup>3</sup>) y el año 2011 (311,92 hm<sup>3</sup>) cuando tan solo escurrió el 40% del escurrimiento medio anual, ocupando el tercer lugar de los años más secos del período de registro, siendo superado solamente por los años 1957 y 1982, cuando los escurrimientos fueron menores a 35% del escurrimiento medio anual.

Para el caso de la estación Varejonal, el escurrimiento medio anual para el período 1939-2015 es de 1.853,05 hm<sup>3</sup>. Los años más secos fueron 1951 (655,62 hm<sup>3</sup>), 1956 (710,68 hm<sup>3</sup>), 1957 (621,83 hm<sup>3</sup>), 1998 (771,97 hm<sup>3</sup>), 2002 (779,02 hm<sup>3</sup>) y el de escurrimiento más bajo ocurrió en 2011 (589,32 hm<sup>3</sup>) en que tan solo escurrió 32% del escurrimiento medio anual.

En el caso de la estación Huites, el escurrimiento medio anual para el período 1949-2015 es de 4.189,94 hm<sup>3</sup>; los años más secos fueron 1951 (1.403,48 hm<sup>3</sup>), 1956 (1.922,91 hm<sup>3</sup>), 1957 (1.633,82 hm<sup>3</sup>), 1998 (2.249,01 hm<sup>3</sup>), 2002 (2.135,51 hm<sup>3</sup>) y el año 2011 (1.708,59 hm<sup>3</sup>) en donde escurrió tan solo el 41% del escurrimiento medio anual.

Las estaciones hidrométricas seleccionadas para el análisis se encuentran inmediatamente aguas arriba de los vasos de las presas, por lo que los volúmenes registrados en ellas son considerados como los volúmenes de ingreso a las presas.

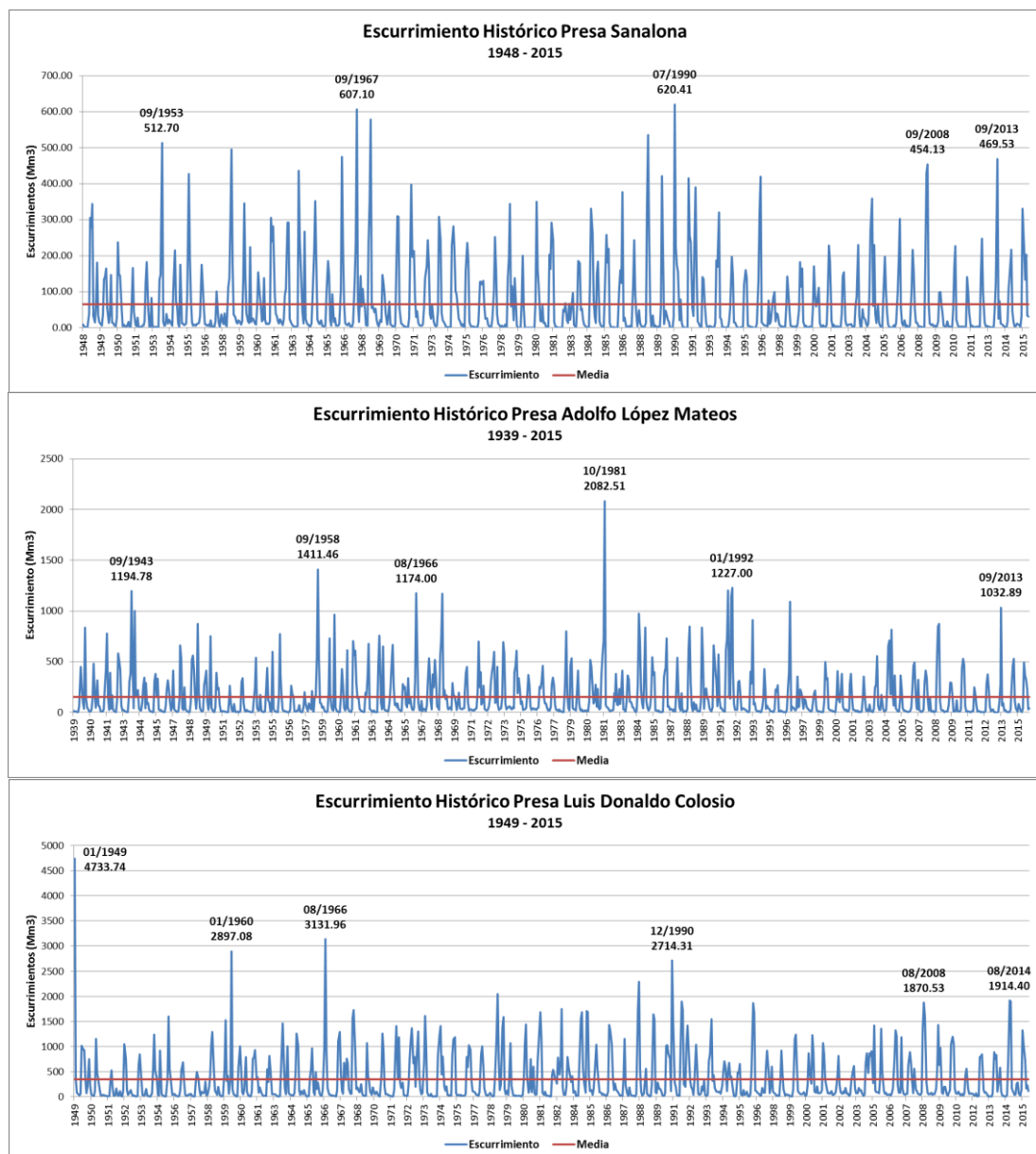


Figura 3.23. Variación mensual de escurrimientos históricos de ingreso a las presas Sanalona, Adolfo López Mateos y Luis Donaldo Colosio.

En la misma figura 3.23, se observan valores mensuales puntuales extraordinariamente altos, en los meses de agosto y septiembre para las estaciones Sanalona y Varejonal, debido a la presencia de eventos ciclónicos y para la estación Huites en los meses agosto, diciembre y enero, debido a que en esta región se presentan avenidas extraordinarias tanto por eventos ciclónicos como por la presencia de los frentes fríos y nevadas en la Sierra Madre Occidental. Se observa que en los años recientes destaca el mes de septiembre de 2013 para las presas Sanalona y Varejonal debido a la presencia del huracán Manuel y el mes de agosto de 2014 en la estación Huites, debido a la presencia de lluvias intensas en la sierra Madre Occidental; notándose que los eventos extremos de precipitación y escurrimiento pueden ser diferentes, según la zona en donde el evento se presente.

En la Figura 3.24 se observan las normales de escurrimiento mensual de las estaciones Sanalona, Adolfo López Mateos (Varejonal) y Luis Donaldo Colosio (Huites), en donde se define claramente la temporada de estiaje de febrero a junio y la temporada de lluvias y escurrimientos importantes de ingreso a las presas de julio a octubre. También, se observa que los meses de mayor aportación a las presas son agosto y septiembre; agosto porque es el más lluvioso en las cuencas de los ríos Tamazula y Humaya que conforman el río Culiacán y del río Fuerte; en cambio septiembre es el mes de más incidencia ciclónica en esta zona.

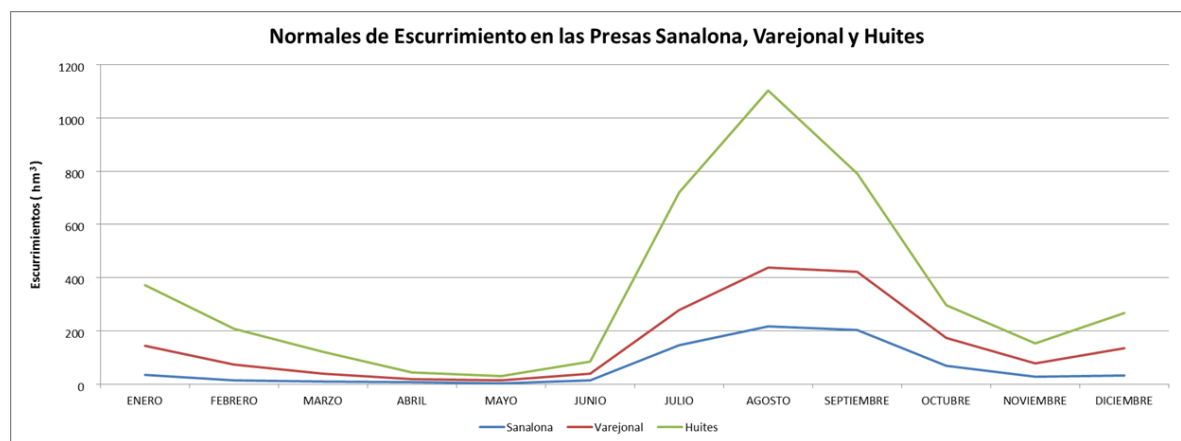


Figura 3.24. Normales de escurrimiento mensual de ingreso a las presas Sanalona, Adolfo López Mateos y Luis Donaldo Colosio.

En esta figura, se observa que el río más caudaloso es el Fuerte con normales de escurrimiento cercanos a los  $1100 \text{ hm}^3$  en el mes de agosto, para luego descender a valores cercanos a  $800 \text{ hm}^3$ , seguido de  $300 \text{ hm}^3$  en octubre y cercanos a los  $200 \text{ hm}^3$  en noviembre. En cambio en los meses de diciembre a febrero, los valores fluctúan entre  $250 \text{ hm}^3$ ,  $380 \text{ hm}^3$  y  $200 \text{ hm}^3$ , respectivamente. En estiaje los valores fluctúan de  $150 \text{ hm}^3$  en marzo a prácticamente cero en el mes de mayo. El comportamiento de las normales mensuales de escurrimiento para las estaciones Varejonal y Sanalona es muy similar al de la estación Huites, pero a una escala inferior; en orden descendente las normales más altas corresponden a la estación Huites, seguidas de Varejonal y Sanalona.

La Figura 3.25 muestra el escurrimiento acumulado mensual de las estaciones hidrométricas que se encuentran en los puntos de ingreso a los vasos de las presas Sanalona, Varejonal y Huites, en donde se observa que durante los primeros meses del año de enero a junio, los volúmenes de ingreso son muy escasos y es a partir de los meses de julio a septiembre cuando se presenta un repunte importante, iniciando un ascenso más suave a partir de octubre. Durante los meses de octubre a diciembre los ingresos son escasos, a excepción de los años húmedos ya sea por eventos ciclónicos o por frentes fríos en invierno.

En las gráficas se comparan de distintos años húmedos, normales y secos con respecto de las normales de escurrimiento mensual (en color negro), destacando como los años más húmedos 2004 y 2015 en Sanalona, 2004 en el Varejonal, y 2004 y 2014 en Huites. Como año normal se consideró al 2013 en Sanalona, 2010, 2013 y 2015 en el Varejonal y los años 2010 y 2015 en Huites. Los años con sequía hidrológica fueron 1998, 2010, 2011 y 2012 en Sanalona, 1998, 2011 y 2012 en el Varejonal, y 1998, 2011 y 2012 en Huites, el año más seco en los tres casos es 2011. El año 2013 es un caso especial para esta región, debido a que durante la mayor parte de los meses de enero a agosto se manifiesta como uno de los años más secos históricamente y en septiembre con la presencia del huracán Manuel, tuvo un importante cambio en su condición, terminando como un año normal en cuanto a volúmenes acumulado anual se refiere en las presas Sanalona y Varejonal, y quedando ligeramente por debajo de la normal en Huites, considerándose como un año con sequía hidrológica incipiente.

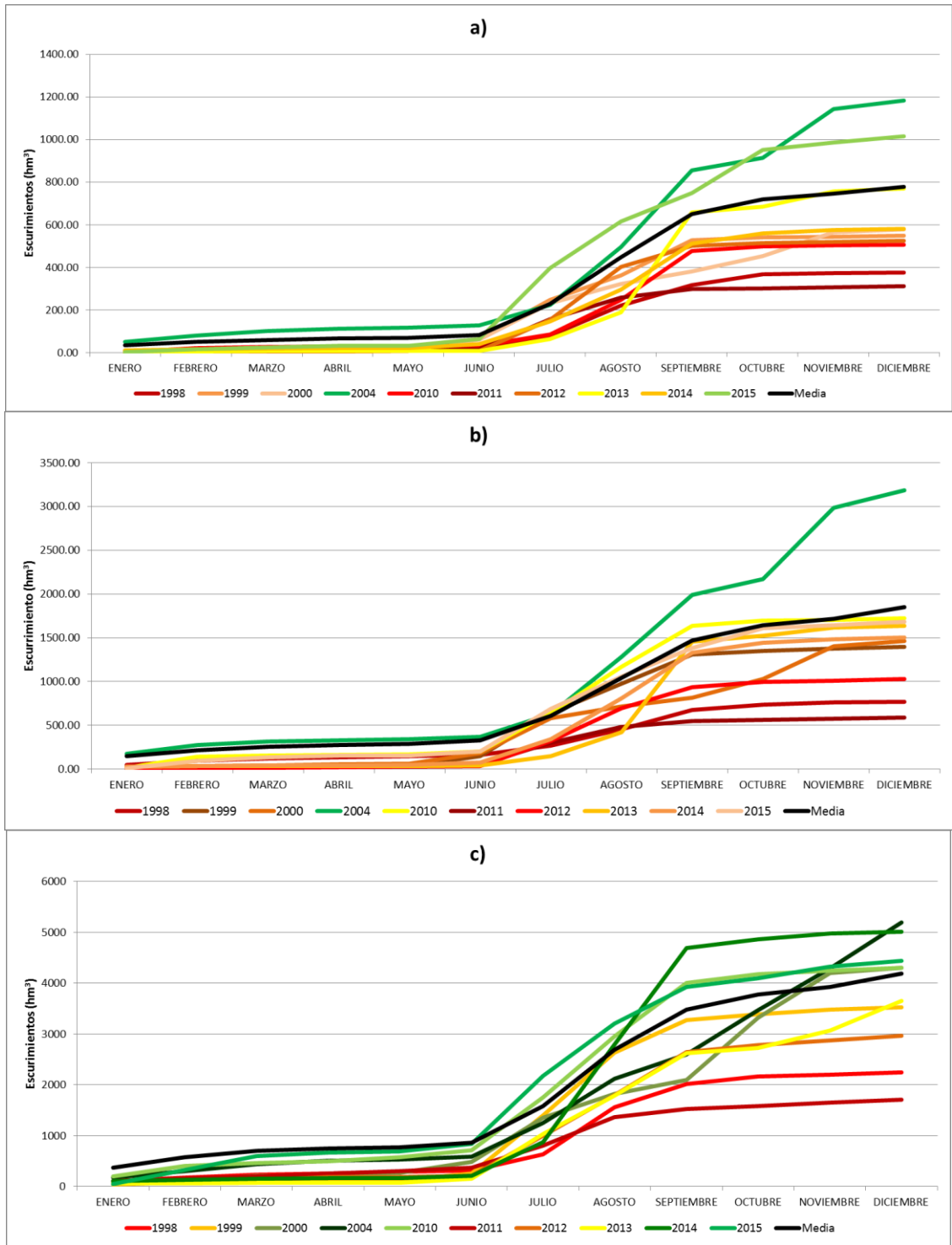


Figura 3.25. Escurrencio acumulado mensual en las presas a) Sanalona, b) Adolfo López Mateos y c) Luis Donaldo Colosio.



## Variabilidad temporal de sequías hidrológicas

En esta sección se analiza la variabilidad temporal de la sequía hidrológica mediante los índices SPI12, SDI e  $I_e$ , para las principales corrientes y embalses del OCPN, conforme a la metodología propuesta en el capítulo anterior. Para ello se han seleccionado algunas estaciones representativas y períodos en donde se ha presentado sequía, de acuerdo a los PMPMS de los Consejos de Cuenca del OCPN, (Torrecillas *et al.*, 2013); así mismo se identifican los períodos normales y húmedos.

### ÍNDICE SPI12

En esta sección se presentan los SPI a 12 meses, obtenidos en el monitoreo meteorológico de las sequías de una sección precedente, y considerando períodos secos, normales y húmedos de interés, para su interpretación desde el punto de vista hidrológico y su posterior correlación con los volúmenes de escurrimiento mensuales ( $Q$ ) y los índices SDI e  $I_e$ .

Como ejemplo ilustrativo, en la Tabla 3.3 se muestran los valores de los índices del SPI a doce meses de la estación Sanalona, en el período 1978-2015. Estos valores se asocian con la sequía hidrológica de la cuenca del río Tamazula de la presa Sanalona hacia aguas arriba. En la tabla se observan sequías extremas desde diciembre de 1979 a julio de 1980, de julio a septiembre de 1993 y febrero y junio de 2011. En años recientes se experimentó sequía severa en agosto y desde octubre a diciembre de 2010, enero a febrero y abril a mayo de 2011. En el año 2012 se presentaron condiciones de normalidad de enero a septiembre, humedad incipiente en octubre y normalidad en noviembre y diciembre. Por reporte, en el año 2013 se presentó sequía incipiente, pasando a condiciones de humedad moderada en septiembre, debido a la presencia del huracán Manuel. Luego en octubre se tuvo humedad incipiente y a fines hubo condiciones humedad moderada. En el año 2014 se tuvieron condiciones de humedad moderada de enero a mayo, humedad excesiva en junio, inicia un descenso en las condiciones de humedad en los meses siguientes del año, julio y agosto fueron de humedad moderada, en septiembre se tuvo sequía incipiente, normalidad en octubre y concluyo el año con sequía moderada. Finalmente, en el año 2015, en enero se

tuvo sequía moderada, sequía incipiente en febrero, normalidad hídrica de marzo a agosto, en septiembre se tuvo humedad incipiente, la cual se incrementó a humedad moderada en el último trimestre del año. La sequía hidrológica más intensa del acuerdo al SPI12 se tuvo durante el período de julio a septiembre de 1993, en donde se alcanzaron valores del SPI12 de -2,63, -2,58 y -2,15, respectivamente, que corresponden a la fase de sequía Extrema.

Tabla 3.3. Valores del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI12), en el período 1978-2015, Estación Sanalona.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Media
1978												-0,53	-0,53
1979	-0,20	-0,23	-0,24	-0,24	-0,23	-0,27	-0,58	-1,31	-1,59	-1,86	-1,84	-2,07	-0,89
1980	-2,39	-2,41	-2,41	-2,38	-2,40	-2,54	-2,12	-0,50	-0,10	0,63	0,74	0,76	-1,26
1981	1,05	1,02	1,05	1,06	1,06	1,15	1,16	0,41	0,07	-0,06	-0,19	-0,21	0,63
1982	-0,51	-0,49	-0,54	-0,55	-0,55	-0,66	-0,87	-1,63	-1,17	-1,88	-1,28	-0,89	-0,92
1983	-0,72	-0,37	-0,24	-0,18	-0,18	-0,19	0,03	0,63	0,14	0,26	0,29	0,09	-0,04
1984	0,18	-0,09	-0,23	-0,28	-0,22	0,31	0,91	0,84	0,75	0,83	0,52	1,05	0,38
1985	0,94	0,92	0,92	0,91	0,86	0,96	0,77	1,38	1,85	1,84	1,71	1,18	1,19
1986	1,05	1,05	1,06	1,07	1,07	0,61	0,24	-0,80	-1,19	0,92	0,91	1,04	0,59
1987	0,93	0,87	0,88	0,87	0,88	0,83	1,09	1,27	1,46	-1,16	-1,13	-0,93	0,49
1988	-0,89	-0,86	-0,87	-0,88	-0,89	-0,69	-0,62	0,38	0,63	0,56	0,54	0,56	-0,25
1989	0,58	0,65	0,65	0,65	0,65	0,46	0,29	1,17	0,79	0,82	1,46	1,40	0,80
1990	1,37	1,32	1,33	1,32	1,32	2,01	2,82	1,92	2,45	2,59	2,09	2,18	1,89
1991	2,05	1,92	1,93	1,91	1,91	1,35	-0,21	-0,28	-0,34	-0,68	-0,44	-0,24	0,74
1992	0,78	0,84	0,85	0,85	0,85	0,88	1,57	1,57	1,26	0,86	0,62	0,17	0,93
1993	-0,87	-0,85	-0,87	-0,86	-0,86	-0,65	-2,63	-2,58	-2,15	-1,59	-1,34	-1,37	-1,39
1994	-1,39	-1,43	-1,36	-1,34	-1,34	-1,49	-0,42	0,55	0,62	0,53	0,59	0,69	-0,48
1995	0,67	0,66	0,60	0,59	0,59	0,44	0,23	-0,84	-0,75	-0,93	-1,33	-1,42	-0,12
1996	-1,26	-1,21	-1,22	-1,20	-1,21	-0,84	-0,03	0,40	0,41	0,42	0,65	0,66	-0,37
1997	0,69	0,70	0,71	1,04	1,05	1,15	0,49	-0,13	-0,37	-0,35	-0,25	-0,01	0,39
1998	-0,15	-0,06	-0,07	-0,47	-0,48	-1,02	-0,93	-0,28	-0,54	-0,47	-0,86	-1,09	-0,54
1999	-1,04	-1,10	-1,12	-1,11	-1,11	-0,47	0,07	-0,86	-1,11	-1,07	-1,07	-1,04	-0,92
2000	-0,99	-0,94	-0,95	-0,94	-0,94	-1,27	-0,80	-0,27	-0,42	0,58	0,89	0,90	-0,43
2001	0,88	0,87	1,00	0,99	1,00	0,94	0,39	0,79	1,08	0,28	-0,07	0,04	0,68
2002	0,04	0,16	0,01	0,01	0,00	-0,29	-0,44	-1,01	-0,20	-0,24	-0,16	-0,24	-0,20
2003	-0,23	-0,28	-0,29	-0,28	-0,28	-0,18	-0,29	-0,57	-0,42	-0,35	-0,42	-0,41	-0,33
2004	0,05	0,08	0,14	0,14	0,13	0,12	0,20	0,88	0,92	1,11	1,49	1,52	0,57
2005	1,24	1,49	1,46	1,44	1,44	1,41	1,80	1,54	0,24	-0,22	-0,70	-0,73	0,87
2006	-0,85	-1,36	-1,37	-1,35	-1,36	-1,00	-1,34	-0,69	0,73	0,66	0,62	0,65	-0,56
2007	0,70	0,68	0,69	0,68	0,68	0,42	-0,01	-0,07	-0,88	-0,79	-0,62	-0,56	0,08
2008	-0,62	-0,59	-0,60	-0,59	-0,59	-0,49	0,17	-0,56	-0,40	-0,36	-0,52	-0,57	-0,48
2009	-0,51	-0,48	-0,47	-0,46	-0,46	-0,31	-0,59	-0,32	-1,46	-0,77	-0,73	-0,62	-0,60
2010	-0,48	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,60	-1,04	-1,53	-0,97	-1,52	-1,56	-1,63	-0,85
2011	-1,74	-1,97	-2,01	-1,98	-1,99	-2,10	-0,50	-0,09	-0,74	-0,66	-0,46	-0,45	-1,22
2012	-0,42	-0,38	-0,39	-0,38	-0,39	-0,16	-0,30	-0,15	0,35	0,50	0,33	0,48	-0,08
2013	0,47	0,45	0,45	0,45	0,45	0,23	-0,06	-0,69	1,05	0,78	1,38	1,32	0,52
2014	1,29	1,25	1,26	1,24	1,24	1,52	1,00	1,24	-0,58	-0,45	-1,04	-1,10	0,57
2015	-1,04	-0,71	-0,45	-0,44	-0,40	-0,41	0,49	0,22	0,57	1,26	1,15	1,42	0,14
Media	-0,04	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,03
Mínima	-2,39	-2,41	-2,41	-2,38	-2,40	-2,54	-2,63	-2,58	-2,15	-1,88	-1,84	-2,07	-1,39
Máxima	2,05	1,92	1,93	1,91	1,91	2,01	2,82	1,92	2,45	2,59	2,09	2,18	1,89

Con los valores del índice SPI12 (Tabla 3.3) se construyó la Figuras 3.26, que ilustra claramente los períodos de sequías de diversas intensidades que se han registrado en la estaciones Sanalona (Figura 3.26a) y Varejonal (Figuras 3.26b), que son los puntos de

salida de las cuencas con escurrimiento virgen de los ríos Humaya y Tamazula en el punto de ingreso de los volúmenes de escurrimiento a los vasos de dichas presas.

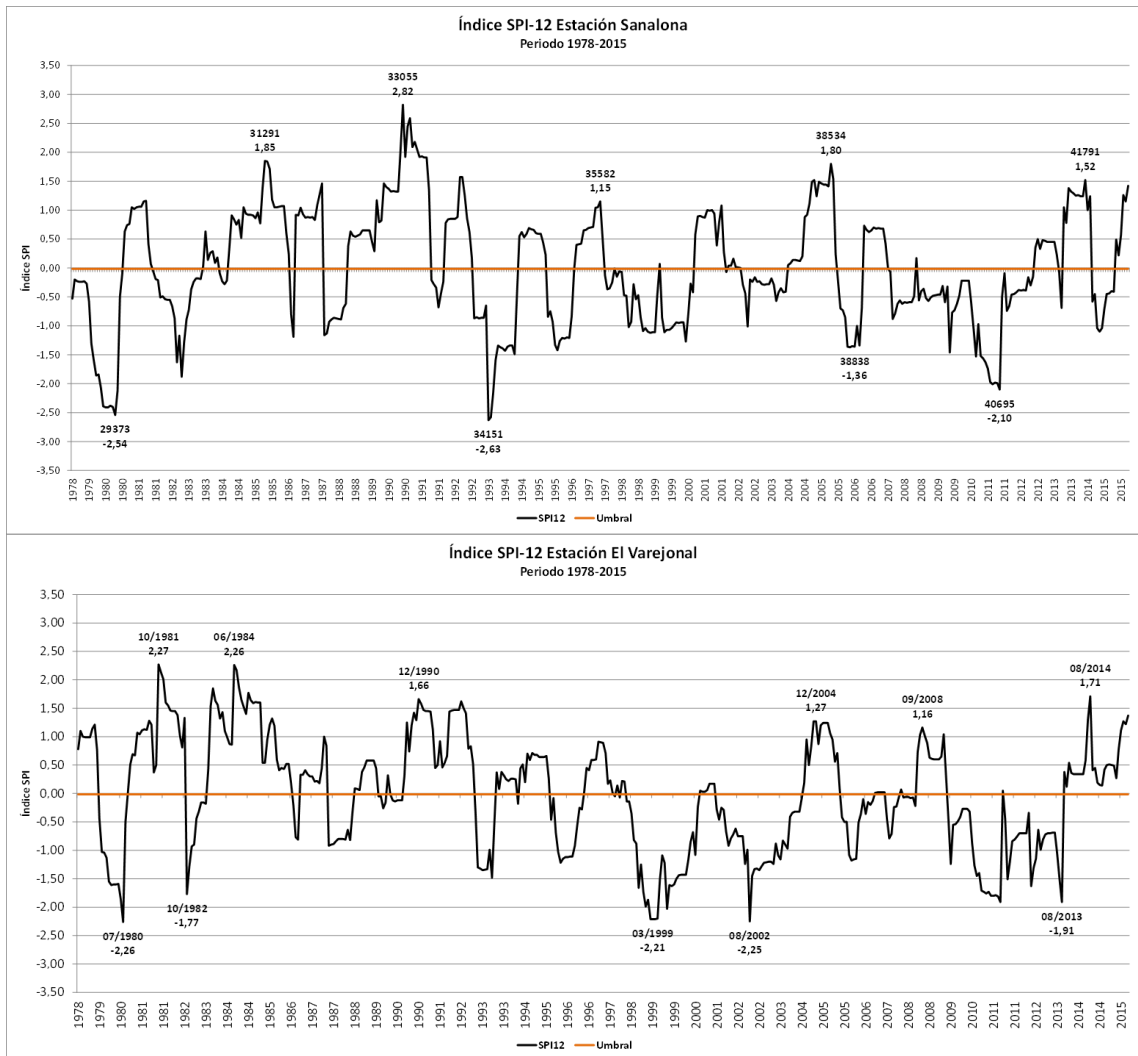


Figura 3.26. Valores del SPI12 de la Estación Sanalona y la Estación Varejónal, en el período 1978-2015

En la Figura 3.26a, para el caso de la presa Sanalona, se observa la ocurrencia de sequías extremas en 1979-1980, 1993 y 2011 con valores mínimos de SPI12 de -2,54 en junio de 1980, -2,63 en julio de 1993 y -2,10 en junio de 2011; sequías severas en 1982, 2010 y 2011 con valores mínimos de -1,88 en octubre de 1982, -1,63 en diciembre de 2010, -1,99 en mayo de 2011; también se observa que la ocurrencia del huracán en septiembre de 2013 favoreció la humedad en estas cuencas alcanzando un SPI12 de 0,54 que corresponde a la fase de humedad incipiente; el año 2014 fue más húmedo alcanzando

un valor de SPI12 de 1,52 que lo ubica en la fase de humedad excesiva; en el año 2015 se alcanzó un valor de 1,42 en fase de humedad moderada. En la Figura 3.26 b, para el caso de la presa Varejonal, se observa la ocurrencia de sequías extremas en 1980, 1999 y 2002 con valores mínimos de SPI12 de -2,26 en julio de 1980, -2,21 en marzo de 1999 y -2,25 en agosto de 2002; sequías severas en 1982, 2010, 2011, 2012 y 2013 con valores mínimos de -1,77 en octubre de 1982, -1,76 en diciembre de 2010, -1,91 en junio de 2011, -1,63 en julio de 2012 y -1,91 en agosto de 2013, un mes antes del huracán Manuel. También se observa que la ocurrencia del huracán incrementó la humedad en estas cuencas alcanzando un SPI12 de 0,54, que corresponde a la fase de humedad incipiente. El año 2014 fue más húmedo aun alcanzando un valor de SPI12 de 1,71 que lo ubica en la fase de humedad excesiva y en el año 2015 se alcanzó un valor de 1,37 en fase de humedad moderada.

En la Figura 3.27, se ilustra el SPI12 del mes de junio de 2012 para todo el OCPN, considerando que físicamente los escurrimientos fueron prácticamente nulos y las presas, entre ellas Varejonal y Sanalona correspondiente al Sistema Hídrico del río Culiacán, alcanzaron al mínimo histórico (Ravelo *et al.*, 2014; Torrecillas *et al.*, 2013 y Sanz *et al.*, 2012). En la figura se observa que más del 40% del OCPN se encontraba en fase de sequía extrema, principalmente en la zona de la sierra Madre Occidental donde se encuentran las áreas de captación de lluvia de las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa, Mocorito, Humaya, Tamazula, San Lorenzo, Elota, Piaxtla y Quélite, que conforman la RH10. Otra zona de sequía extrema en una amplia extensión se observa en la parte alta de las cuencas de los ríos Presidio, Baluarte y San Pedro.

En la Foto A, se ilustra el nivel del agua de la presa Sanalona hacia junio de 2012, como una evidencia de la sequía hidrológica extrema. El análisis de la sequía meteorológica mediante los índices SPI, PDSI y NDVI indica que esta sequía hidrológica inicialmente fue generada por la extracción del agua de las presas para la resiembra de los cultivos dañados por la helada en febrero de 2011 y agravada por la sequía meteorológica del período 2011-2012.

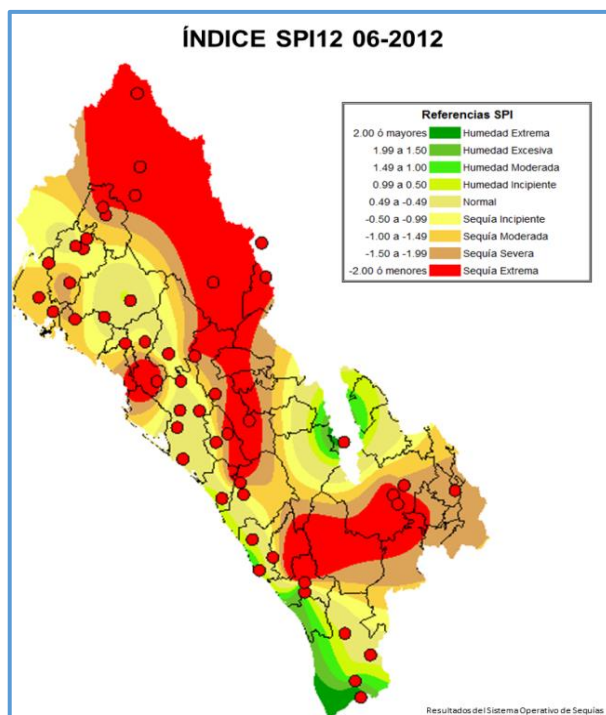


Figura 3.27. Variabilidad espacial del Índice de Precipitación Estandarizado a doce meses (SPI12) en el OCPN, para el mes de junio de 2012.



Foto A: Vista panorámica del vaso de almacenamiento de la presa Sanalona desde la cortina hacia aguas arriba, en el mes de junio de 2012, con un nivel de almacenamiento del 3%.

## ÍNDICE SDI

En esta sección se presenta el comportamiento temporal del SDI mensual histórico, de los principales flujos de aguas superficiales y embalses del OCPN, en donde se aprecian con claridad los períodos secos, normales y húmedos de interés, dentro de la zona en estudio.

Como ejemplo ilustrativo, la Tabla 3.4 muestra los valores de los índices del SDI de la estación Sanalona en el período 1948-2015. Estos valores se asocian con la sequía hidrológica de la cuenca del río Tamazula de la presa Sanalona ubicada aguas arriba. En la tabla se observan sequías extremas en octubre y noviembre de 1979; sequía severa en abril, junio y diciembre de 1979, marzo y abril de 1980, abril de 1982, junio de 1991, febrero de 1995, marzo 1996 y febrero de 2001; Sequía moderada en mayo de 1951, julio de 1957, mayo de 1979, mayo de 1980, agosto de 1982, mayo de 1984, mayo de 1986, mayo de 1991 y mayo de 1996, y ligeras en diferentes meses del año a lo largo de la serie histórica, destacando en años más recientes septiembre y noviembre de 1957, septiembre de 1979, enero y febrero de 1980, febrero, marzo, junio, julio y septiembre de 1982, enero a marzo de 1994, agosto y septiembre del 2000, enero a marzo del 2006, agosto a octubre de 2011, enero y febrero de 2012, y junio a julio de 2013; En cuanto a los meses húmedos, en años recientes destacan los meses de abril de 1997 y noviembre de 2004 con humedad intensa; febrero, marzo y septiembre de 2004, septiembre y noviembre de 2013, con humedad ligera pese a la presencia del huracán Manuel; en el año 2014 se tuvieron condiciones de normalidad hídrica; finalmente, en el año 2015, en junio, julio y octubre se presentaron condiciones de humedad ligera. La sequía hidrológica más intensa del acuerdo al SDI se presentó de abril de 1979 a mayo de 1980, en donde se alcanzaron valores del SDI -4,7, -4,1 (sequía extrema) y -3,9 (sequía intensa) en los meses de octubre a diciembre de 1979, respectivamente.

Tabla 3.4. El índice de Sequía de Ecurrimiento (SDI) de los volúmenes de ingreso a la presa Sanalona, en el período 1948-2015.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Media
1948	-0,4	-0,4	-0,5	-0,3	-0,4	1,3	1,6	0,8	1,1	-0,2	-0,1	1,1	0,3
1949	2,0	1,1	0,9	0,9	0,8	1,2	0,1	-0,7	-0,1	0,2	-0,1	0,6	0,6
1950	1,8	0,5	0,7	0,5	0,6	1,0	1,1	-0,6	-0,3	0,2	-0,8	-0,4	0,3
1951	-0,7	-0,3	-0,1	1,2	-2,7	-0,4	-0,8	-0,4	-1,7	-1,1	-0,8	0,3	-0,6
1952	-1,5	-0,9	-0,5	0,4	0,8	0,6	0,0	-0,2	-1,6	-1,6	-1,9	1,3	-0,4
1953	-0,6	-0,7	-0,2	-0,5	-0,2	-1,1	0,1	-0,6	1,9	-0,6	-0,6	-0,5	-0,3
1954	0,5	0,3	1,2	1,3	1,4	-0,1	-0,2	0,2	-1,2	0,2	-0,2	-0,9	0,2
1955	2,0	0,3	0,6	0,5	1,3	0,3	-0,5	1,9	0,1	0,5	-0,1	-0,7	0,5
1956	-0,3	-0,2	0,5	0,9	1,6	1,1	0,5	-1,0	-1,5	-1,0	-0,4	-0,6	0,0
1957	-0,4	-0,2	1,1	0,1	0,4	-0,4	-2,3	-1,3	-1,6	-0,8	-1,0	0,5	-0,5
1958	0,0	0,2	1,8	0,7	0,7	2,6	0,1	0,9	1,9	1,4	0,7	0,4	1,0
1959	0,0	0,3	1,1	1,3	1,2	0,6	0,0	1,3	-0,3	-0,1	0,1	-0,2	0,4
1960	2,3	0,5	1,3	1,6	1,5	0,2	-1,1	-0,5	-0,7	0,3	0,1	0,2	0,5
1961	1,7	0,7	0,5	0,9	1,3	0,6	1,6	0,4	0,8	0,7	0,7	0,4	0,9
1962	0,0	0,3	1,2	1,1	1,0	0,8	-0,5	-1,2	0,8	2,1	0,3	0,0	0,5
1963	-0,3	-0,1	-0,3	-0,3	0,1	-0,1	2,3	0,5	-0,5	0,0	-0,2	3,0	0,3
1964	0,2	0,2	0,4	0,2	0,5	0,3	-0,5	0,2	1,2	1,4	0,3	-0,1	0,4
1965	-0,3	0,7	0,1	0,3	0,6	-0,2	-0,4	-0,1	-0,3	-0,6	-0,6	1,4	0,1
1966	-0,1	0,9	0,2	0,3	0,9	0,2	-0,3	2,2	0,4	0,4	-0,1	-0,4	0,4
1967	-0,4	0,4	0,0	-0,2	0,4	0,5	0,0	0,4	2,3	0,4	0,0	2,0	0,5
1968	0,9	2,5	2,6	2,8	1,1	-0,1	1,1	1,4	2,2	0,2	1,2	0,7	1,4
1969	0,8	0,7	0,4	0,0	2,1	0,5	0,2	-0,9	-0,9	-0,1	-0,4	0,5	0,2
1970	1,0	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,4	1,0	0,9	0,1	-0,2	-0,4	0,3
1971	-0,5	-0,3	-0,3	-0,4	0,1	0,9	0,8	1,7	0,2	1,6	1,6	0,4	0,5
1972	0,7	0,4	0,3	0,3	0,8	0,2	-1,1	-0,7	-0,1	1,8	2,6	0,6	0,5
1973	0,2	1,7	1,0	0,5	0,5	-0,2	-1,4	1,0	0,5	-0,1	0,2	0,0	0,3
1974	-0,3	-0,5	-0,5	-0,6	-0,2	-0,7	1,0	0,8	0,3	0,8	1,7	1,0	0,2
1975	0,2	0,5	0,0	0,8	0,1	-0,7	0,3	0,4	0,1	-0,7	-0,6	-0,7	0,0
1976	-0,8	-0,5	-0,6	-0,5	-0,5	0,5	0,0	-0,9	-0,6	1,0	1,1	0,2	-0,1
1977	0,3	0,1	-0,1	-0,2	0,2	0,8	-0,4	0,5	-0,1	-0,1	-0,2	-0,7	0,0
1978	-0,8	-0,1	-0,5	-0,4	1,1	-0,4	0,1	-0,1	1,1	0,2	2,0	0,1	0,2
1979	1,7	2,0	0,2	-3,2	-2,7	-3,4	-0,8	0,0	-1,6	-4,7	-4,1	-3,9	-1,7
1980	-1,5	-1,7	-3,4	-3,2	-2,7	-0,7	-0,8	1,3	-0,1	0,9	0,2	0,0	-1,0
1981	0,9	0,4	0,8	-0,6	0,3	-0,4	0,8	-0,4	0,8	1,8	0,0	-0,8	0,3
1982	-0,8	-1,0	-1,3	-3,2	-0,7	-1,0	-1,2	-2,6	-1,3	-0,6	-0,1	1,1	-1,1
1983	0,2	1,5	3,2	0,6	0,6	-1,2	-1,0	-0,1	0,0	0,1	1,0	0,2	0,4
1984	-0,4	-0,1	-1,4	-0,3	-2,7	2,8	1,7	0,6	-1,1	-0,3	-0,1	2,1	0,1
1985	2,1	0,6	0,2	0,2	-0,1	-0,4	-0,3	0,6	0,0	1,7	-0,1	-1,1	0,3
1986	-1,2	-1,1	-0,8	-0,9	-2,7	-0,6	-0,2	-0,4	-0,5	2,5	0,2	0,3	-0,4
1987	-1,0	-0,7	0,0	-0,1	0,9	-1,3	-0,1	0,5	-0,9	-0,1	-0,9	0,8	-0,2
1988	-0,1	-0,2	-0,4	0,0	0,1	0,3	1,8	2,5	0,6	0,0	-1,0	0,5	0,4
1989	-0,8	0,0	-0,8	0,0	0,4	-0,8	-1,1	1,8	0,3	-1,0	0,9	0,5	0,0
1990	0,2	0,5	-0,7	-1,0	-0,8	1,0	3,3	0,3	0,0	1,2	0,2	1,3	0,5
1991	-0,1	-0,4	-0,9	-1,1	-2,7	-3,4	2,2	0,6	0,5	0,2	0,6	2,8	-0,1
1992	3,2	3,1	1,0	0,6	-0,1	-1,9	0,1	-0,8	-1,2	-0,9	-1,3	-0,9	0,1
1993	-0,7	-0,2	-0,7	-0,7	-0,4	0,3	0,6	-0,3	1,0	-0,3	0,3	-0,9	-0,2
1994	-1,2	-1,0	-1,2	-0,6	-0,3	0,6	-1,1	0,0	-0,3	-0,7	-0,1	-0,5	-0,5
1995	-1,1	-3,3	-1,2	-0,7	-0,6	-0,1	-0,1	-0,4	-0,4	-1,2	-0,6	-1,3	-0,9
1996	-0,9	-0,9	-3,4	-1,1	-2,7	0,4	0,1	1,1	1,5	-0,7	-0,2	-0,5	-0,6
1997	-0,5	-0,1	-0,1	3,3	1,4	0,6	-0,9	-1,6	-0,8	-0,6	0,7	0,5	0,1
1998	-0,4	-0,1	-0,8	0,2	0,1	-0,8	-1,1	-0,7	-0,8	0,1	-0,7	-0,8	-0,5
1999	-0,8	-0,8	-0,2	-0,3	0,9	1,5	0,6	-1,1	-0,1	-0,7	-1,1	-0,6	-0,2
2000	-1,1	-0,9	-0,5	-0,1	0,1	1,6	0,5	-1,5	-1,4	0,4	1,9	-0,2	-0,1
2001	-0,6	-3,3	0,3	0,0	0,1	0,2	-0,4	0,3	0,1	-0,6	-0,9	-0,5	-0,4
2002	-0,9	-0,4	0,0	-0,2	-0,1	-0,7	-1,6	-0,6	-0,2	-0,6	-0,5	-0,7	-0,5
2003	-0,4	0,1	0,5	-0,1	0,5	-0,3	-1,0	-1,6	0,4	-0,2	-0,7	-1,0	-0,3
2004	0,7	1,0	1,2	0,8	0,7	0,3	-0,4	0,7	1,2	0,3	3,1	0,6	0,8
2005	-0,2	1,8	0,7	0,3	-0,3	-0,7	-0,6	0,0	-0,8	0,0	-0,4	-0,9	-0,1
2006	-1,0	-1,4	-1,1	0,5	0,5	0,4	-0,3	-0,1	0,9	0,2	-0,1	-0,7	-0,2
2007	0,1	-0,6	0,3	-0,5	-0,2	-0,1	-0,3	0,2	-0,2	0,2	0,0	-0,1	-0,1
2008	-0,7	-0,6	-0,2	-0,1	-0,5	-0,5	0,7	-1,9	1,7	0,4	-0,2	-0,6	-0,2
2009	-0,3	-0,2	0,2	0,1	0,3	0,6	-0,4	-1,3	-1,3	0,0	-0,6	-0,9	-0,3
2010	-0,6	0,6	-0,1	-0,1	0,5	-0,8	-1,2	-0,4	0,4	-0,5	-0,6	-1,1	-0,3
2011	-0,9	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	-0,3	0,2	-1,3	-1,8	-1,6	-0,6	-0,8	-0,7
2012	-1,3	-1,1	-0,4	-0,2	0,3	-0,7	0,2	0,5	-0,8	-0,7	-0,7	-0,8	-0,5
2013	-0,6	-0,5	-0,9	-0,9	-0,4	-1,2	-1,1	-0,9	1,8	-0,4	1,4	-0,2	-0,3
2014	-0,3	0,0	-0,3	-0,5	-0,3	0,6	-0,3	-0,6	0,3	0,0	0,1	-0,8	-0,2
2015	-0,7	0,3	0,3	0,6	-0,1	1,1	1,7	0,2	-0,4	1,5	0,6	0,4	0,5
Media	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Minima	-1,5	-3,3	-3,4	-3,2	-2,7	-3,4	-2,3	-2,6	-1,8	-4,7	-4,1	-3,9	-1,7
Máxima	3,2	3,1	3,2	3,3	2,1	2,8	3,3	2,5	2,3	2,5	3,1	3,0	1,4

En la Figura 3.28 se muestra el comportamiento histórico de los índices de sequía de escurrimientos (SDI) de los volúmenes de ingreso a las presas Sanalona, Varejonal y Huites dentro del período de análisis 1948-2015, 1939-2015 y 1949-2015, respectivamente.

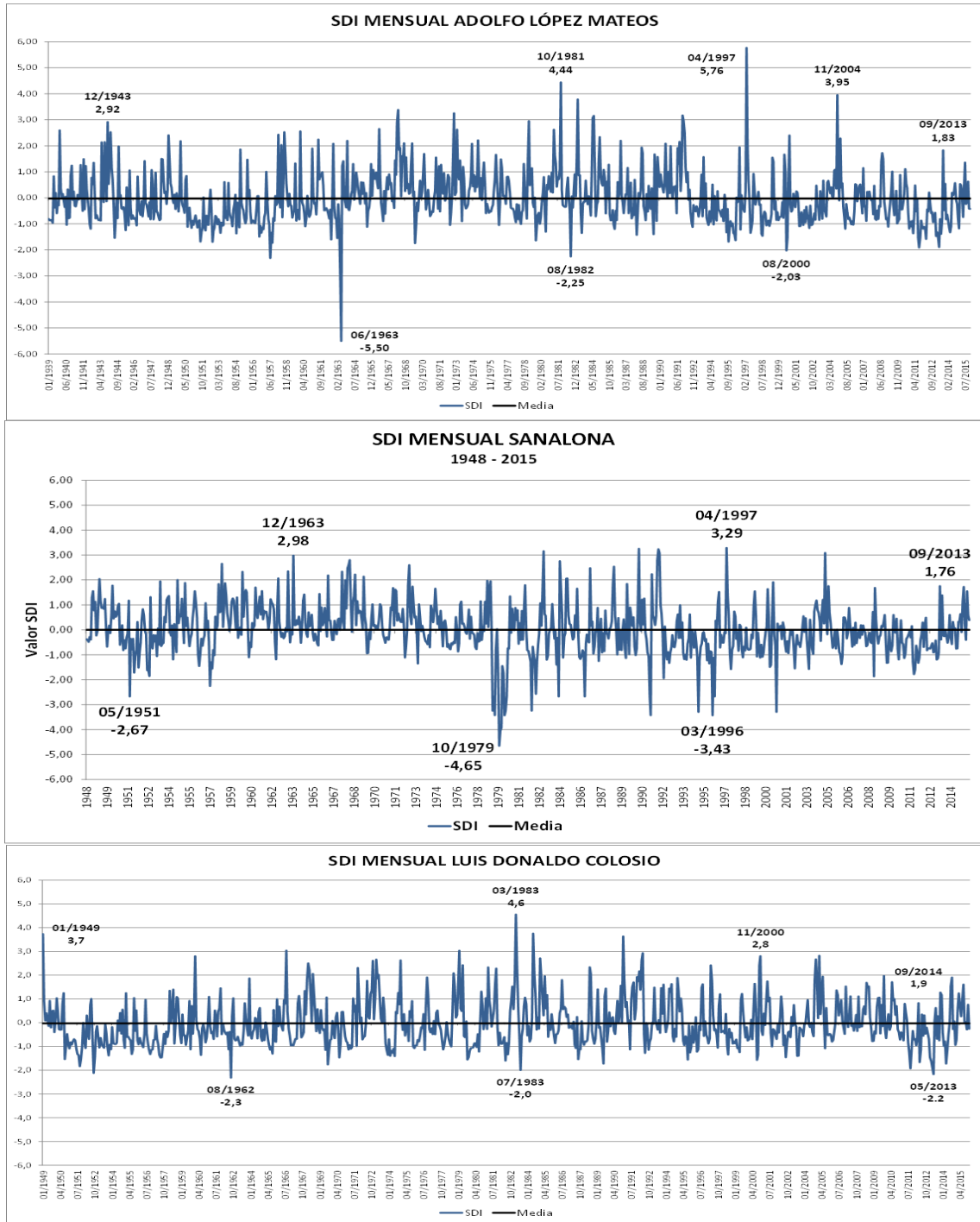


Figura 3.28. Variación del índice de escurrimiento de sequía (SDI) mensual, en Sanalona, Varejonal y Huites.



En la estación Sanalona, antes del ingreso de los escurrimientos al vaso de la presa, sobresalen los eventos húmedos de abril de 1997, julio de 1990, febrero de 1992 y noviembre de 2004 con valores de SDI superiores a 3,0, que los clasifica como humedad intensa. En el mes de septiembre de 2013, cuando se presentó el huracán Manuel, se alcanzó un SDI=1,76, correspondiéndole humedad ligera. El año 2015 alcanzó la clasificación de humedad ligera, para la cuenca del río Tamazula hasta la presa Sanalona; en cuanto a los eventos de sequía hidrológica sobresalen el mes de octubre de 1979 con SDI=-4,65, clasificándose como sequía hidrológica extrema, abril de 1982, junio de 1991, febrero de 1995, marzo de 1996 y febrero de 2001, con valores de SDI menores a -3,0, clasificándose como sequías hidrológicas intensas. Mientras las sequías hidrológicas del período 2010-2013 se clasificaron como ligeras, el año de 2014 fue considerado como normal. La sequía hidrológica más severa e intensa ocurrió en el período entre abril de 1979 y julio de 1980.

En la estación Varejonal, antes del ingreso de los escurrimientos al vaso de la presa Adolfo López Mateos, sobresalen los eventos húmedos de octubre de 1981 y abril de 1997, con valores de SDI superiores a 4,0 (humedad extrema); marzo de 1968, noviembre de 1972, marzo de 1983, junio y julio de 1984, diciembre de 1991, enero de 1992 y noviembre de 2004, con valores de SDI mayores a 3,0 (humedad intensa). Más de 24 valores de SDI fluctúan entre 2,0 y 3,0, que corresponden a la fase de humedad moderada, destacando diciembre de 1943, agosto de 1966, febrero de 1968, febrero de 1979, enero de 1992, noviembre de 2000 y febrero de 2005. En los años recientes de marzo de 2005 a diciembre de 2015 solo se han presentado condiciones de humedad con valores de SDI inferiores a 2,0, sobresaliendo septiembre de 2008 y septiembre de 2013, cuando se presentó el huracán Manuel, que alcanzó un SDI=1,83, y julio de 2015 con SDI= 1,36, correspondiéndoles humedad ligera, para la cuenca del río Humaya hasta la presa Varejonal. En cuanto a los eventos de sequía hidrológica sobresales el mes de junio de 1963 con SDI=-5,50 (sequía hidrológica extrema), julio de 1957 con SDI= -2,31, agosto de 1982 con un SDI= -2,25 y agosto de 2000 con SDI= -2,03 (sequía hidrológica moderada). La mayor cantidad de meses con sequía hidrológica se ubican en la fase de sequía ligera, destacando agosto de 1969, septiembre de 1979, julio de 1989, octubre de 1995, mayo de 1996, septiembre de 2011 y mayo de 2013 con valores de SDI mayores a -2,0. Las

sequías hidrológicas del período 2010-2013 se clasificaron como ligera, el año de 2014 presentó sequía ligera en abril con un SDI= -1,33, el resto de los meses fue considerado como normal. El año 2015 se presentó con condiciones de humedad entre normal y ligera, y sequía ligera en el mes de enero con SDI= -1,18. La sequía hidrológica más severa e intensa ocurrió en el período de mayo a junio de 1963.

En la estación Huites, antes del ingreso de los escurrimientos al vaso de la presa Luis Donaldo Colosio, sobresalen los eventos húmedos de marzo de 1983 con SDI= 4,6 (humedad extrema), seguido de enero de 1949 con SDI= 3,7, junio de 1984 con SDI= 3,8 y diciembre de 1990 con SDI= 3,6 (humedad intensa). Más de 20 meses poseen valores de SDI que fluctúan entre 2,0 y 3,0 (humedad moderada) destacando agosto de 1966, febrero de 1979, mayo de 1992, noviembre de 2000 y febrero de 2005; en los años recientes destacan noviembre de 2013 con SDI= 1,3, septiembre de 2014 con SDI= 1,9 y julio de 2015 con SDI= 1,6 (humedad ligera). En el mes de septiembre de 2013 cuando se presentó el huracán Manuel en la cuenca del río Culiacán se alcanzó un SDI= 0,3 que corresponde a la fase de normalidad hídrica, lo cual indica que no hubo influencia del huracán en esta zona. En cuanto a los eventos de sequía hidrológica sobresalen el mes de agosto de 1962 con SDI=-2,3, Julio de 1983 con SDI= -2,0 y mayo de 2013 con SDI= -2,2 (sequía hidrológica moderada); en todo el período de análisis no se registraron sequías hidrológicas ni intensas ni extremas. Las sequías hidrológicas del período 2010-2013 en su mayoría se clasifican como ligeras, destacando septiembre de 2011 con SDI= -1,9 y mayo de 2009 con SDI= -1,7, la mayoría de los meses de este período se manifestó como normalidad hídrica. En el año 2014 se presentó sequía hidrológica ligera en los meses de febrero, abril y mayo con valores del SDI de -1,0, -1,7 y -1,1, respectivamente, pasando a condiciones de humedad ligera en los meses de agosto y septiembre con valores de SDI de 1,5 y 1,9, respectivamente. En el año 2015 prevalecieron condiciones de normalidad hídrica en la mayoría de los meses y humedad ligera en los meses de marzo, junio y julio con valores de SDI= 1,2, 1,0 y 1,6, respectivamente. Las sequías hidrológicas más severas ocurrieron en los meses de septiembre de 1952, agosto de 1962 y mayo de 2013.

## ÍNDICE Ie

En esta sección se presenta el comportamiento temporal del índice de Estado de presa (Ie) mensual histórico de los principales embalses del OCPN, en donde se aprecian con claridad los períodos secos, normales y húmedos de interés, para la zona en estudio.

Como ejemplo ilustrativo, en la Tabla 3.5 se muestran los valores de los índices de Estado de las presas (Ie) de la presa Sanalona, en el período 1948-2015. Estos índices se asocian con la sequía hidrológica de la cuenca del río Tamazula aguas arriba de la presa Sanalona y el manejo de las aguas hacia aguas abajo del embalse. En la tabla se observan situaciones de emergencia (color rojo) en la temporada de estiaje (febrero a junio) en la mayoría de los años, con recuperación (color verde) en la temporada de lluvias (de finales de junio a octubre) debido a la alta demanda aguas abajo de la presa. En los años con sequía hidrológica intensa y extrema la recuperación del embalse no se da de manera deseada y se presentan situaciones de emergencia en los meses noviembre y diciembre. Entre los años más sobresalientes están el período 1951-1953, 1957, 1979-1980, 1994-1996, 1997-2004 y 2009-2012. El año 2013 presentó situación de emergencia en los primeros meses del año y solo fue posible su recuperación cuando en el mes de septiembre se presentó el huracán Manuel que llenó el embalse de la presa. En el año 2014 se presentaron situaciones de prealerta (color amarillo) en enero, alerta (color café) en los meses de febrero y marzo, emergencia en abril y mayo, iniciando su recuperación en junio hasta lograr condiciones estables en septiembre al final de la temporada de lluvias. El año 2015 tuvo un comportamiento similar a 2014, pero logrando más rápido su condición de estabilidad a partir del mes de agosto hasta el mes de octubre, confirmando la condición de año lluvioso o húmedo. Las situaciones de emergencia más crítica se presentaron en mayo de 1948, junio de 1951 y junio de 2012 con valores de  $Ie = 0,01$ . La condición más severa históricamente de la sequía hidrológica en los almacenamientos de esta presa fue de enero a junio de 2012, cuando se combinaron los volúmenes extraídos de las presas para la resiembra de más de 400,000 has y la sequía severa que dejaron las presas por debajo del 5% de su capacidad total y la situación crítica más extendida del embalse de la presa se presentó en el período 2009-2012.

Tabla 3.5. Variación del Índice de estado de la presa (Ie) de la presa Sanalona, en el período 1948-2015.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1948	0.08	0.05	0.04	0.03	0.01	0.17	0.41	0.56	0.68	0.46	0.38	0.60
1949	0.66	0.48	0.39	0.38	0.33	0.45	0.60	0.63	0.65	0.56	0.38	0.47
1950	0.62	0.38	0.37	0.33	0.29	0.37	0.61	0.62	0.64	0.57	0.33	0.32
1951	0.27	0.25	0.24	0.25	0.14	0.10	0.33	0.41	0.36	0.21	0.14	0.22
1952	0.10	0.09	0.08	0.07	0.05	0.09	0.33	0.42	0.39	0.20	0.14	0.40
1953	0.11	0.09	0.08	0.04	0.02	0.01	0.32	0.39	0.64	0.39	0.34	0.33
1954	0.46	0.35	0.38	0.33	0.28	0.24	0.48	0.58	0.57	0.55	0.35	0.29
1955	0.60	0.35	0.35	0.32	0.31	0.29	0.50	0.68	0.67	0.61	0.38	0.33
1956	0.34	0.31	0.31	0.30	0.28	0.32	0.50	0.55	0.52	0.31	0.26	0.20
1957	0.17	0.14	0.19	0.10	0.07	0.04	0.10	0.32	0.31	0.16	0.10	0.24
1958	0.17	0.14	0.27	0.15	0.09	0.35	0.41	0.56	0.75	0.66	0.49	0.45
1959	0.39	0.37	0.41	0.37	0.31	0.32	0.54	0.67	0.64	0.50	0.40	0.37
1960	0.65	0.39	0.43	0.40	0.33	0.29	0.47	0.56	0.57	0.55	0.33	0.33
1961	0.54	0.35	0.30	0.29	0.24	0.22	0.51	0.61	0.69	0.62	0.49	0.46
1962	0.40	0.37	0.40	0.34	0.27	0.31	0.46	0.50	0.60	0.67	0.43	0.37
1963	0.33	0.29	0.26	0.22	0.15	0.10	0.49	0.60	0.60	0.48	0.31	0.62
1964	0.40	0.33	0.31	0.27	0.23	0.18	0.37	0.44	0.58	0.60	0.41	0.36
1965	0.34	0.39	0.33	0.32	0.31	0.28	0.52	0.56	0.56	0.33	0.25	0.52
1966	0.31	0.36	0.28	0.27	0.28	0.28	0.50	0.68	0.66	0.61	0.36	0.33
1967	0.31	0.33	0.27	0.26	0.25	0.28	0.48	0.55	0.77	0.54	0.32	0.55
1968	0.51	0.55	0.55	0.52	0.30	0.29	0.62	0.69	0.81	0.56	0.58	0.51
1969	0.55	0.40	0.32	0.27	0.33	0.28	0.48	0.51	0.52	0.40	0.24	0.29
1970	0.40	0.15	0.10	0.06	0.05	0.08	0.38	0.50	0.62	0.52	0.31	0.26
1971	0.23	0.18	0.14	0.12	0.11	0.21	0.45	0.61	0.64	0.68	0.62	0.44
1972	0.50	0.35	0.31	0.26	0.20	0.16	0.32	0.38	0.43	0.54	0.57	0.44
1973	0.38	0.53	0.33	0.27	0.21	0.14	0.28	0.45	0.57	0.43	0.32	0.26
1974	0.19	0.13	0.13	0.12	0.12	0.10	0.41	0.51	0.57	0.56	0.55	0.52
1975	0.38	0.35	0.29	0.29	0.22	0.18	0.42	0.45	0.52	0.29	0.22	0.18
1976	0.14	0.11	0.09	0.06	0.05	0.11	0.36	0.42	0.48	0.54	0.52	0.38
1977	0.39	0.32	0.27	0.23	0.18	0.23	0.37	0.46	0.55	0.41	0.29	0.24
1978	0.18	0.14	0.08	0.04	0.06	0.04	0.34	0.41	0.58	0.53	0.58	0.33
1979	0.52	0.52	0.27	0.23	0.17	0.12	0.36	0.44	0.39	0.15	0.12	0.10
1980	0.08	0.08	0.07	0.06	0.04	0.04	0.32	0.47	0.55	0.57	0.37	0.36
1981	0.55	0.35	0.35	0.27	0.25	0.23	0.51	0.51	0.58	0.62	0.38	0.33
1982	0.31	0.28	0.25	0.23	0.20	0.16	0.34	0.29	0.38	0.20	0.17	0.39
1983	0.23	0.36	0.45	0.22	0.18	0.15	0.38	0.46	0.55	0.45	0.47	0.34
1984	0.28	0.25	0.21	0.17	0.12	0.39	0.54	0.64	0.60	0.44	0.35	0.60
1985	0.64	0.39	0.33	0.32	0.30	0.29	0.55	0.62	0.62	0.65	0.37	0.30
1986	0.28	0.25	0.24	0.23	0.22	0.19	0.44	0.48	0.52	0.66	0.40	0.42
1987	0.29	0.27	0.26	0.23	0.21	0.14	0.41	0.50	0.51	0.32	0.11	0.28
1988	0.13	0.10	0.08	0.08	0.07	0.11	0.46	0.72	0.69	0.52	0.30	0.42
1989	0.28	0.27	0.23	0.19	0.14	0.09	0.29	0.52	0.60	0.33	0.45	0.39
1990	0.34	0.31	0.24	0.21	0.16	0.24	0.63	0.65	0.65	0.64	0.41	0.59
1991	0.35	0.29	0.26	0.23	0.19	0.14	0.54	0.62	0.65	0.54	0.45	0.67
1992	0.76	0.65	0.39	0.34	0.30	0.28	0.60	0.61	0.59	0.35	0.29	0.28
1993	0.26	0.24	0.20	0.15	0.10	0.10	0.37	0.46	0.61	0.41	0.38	0.28
1994	0.24	0.22	0.17	0.13	0.10	0.15	0.31	0.43	0.57	0.29	0.26	0.21
1995	0.17	0.14	0.10	0.05	0.03	0.05	0.33	0.41	0.48	0.25	0.24	0.17
1996	0.14	0.10	0.07	0.03	0.02	0.07	0.34	0.49	0.68	0.37	0.34	0.30
1997	0.28	0.27	0.25	0.47	0.23	0.18	0.35	0.38	0.42	0.24	0.33	0.32
1998	0.20	0.18	0.15	0.14	0.11	0.08	0.30	0.40	0.45	0.42	0.21	0.17
1999	0.12	0.09	0.08	0.04	0.05	0.23	0.37	0.44	0.53	0.31	0.23	0.22
2000	0.17	0.14	0.10	0.07	0.05	0.25	0.37	0.42	0.43	0.49	0.53	0.31
2001	0.26	0.21	0.20	0.15	0.10	0.11	0.36	0.47	0.57	0.36	0.27	0.26
2002	0.22	0.19	0.16	0.08	0.04	0.02	0.18	0.35	0.43	0.27	0.20	0.17
2003	0.16	0.12	0.11	0.04	0.03	0.03	0.29	0.34	0.45	0.35	0.23	0.18
2004	0.37	0.28	0.24	0.16	0.11	0.13	0.37	0.50	0.66	0.54	0.63	0.45
2005	0.33	0.52	0.32	0.27	0.23	0.20	0.46	0.55	0.56	0.47	0.30	0.25
2006	0.22	0.17	0.13	0.11	0.07	0.10	0.34	0.44	0.59	0.52	0.34	0.30
2007	0.35	0.25	0.26	0.19	0.15	0.15	0.41	0.51	0.56	0.52	0.33	0.31
2008	0.26	0.24	0.21	0.16	0.11	0.08	0.41	0.61	0.75	0.57	0.32	0.29
2009	0.30	0.25	0.17	0.09	0.05	0.11	0.33	0.38	0.42	0.35	0.21	0.17
2010	0.16	0.20	0.12	0.07	0.04	0.02	0.25	0.37	0.49	0.32	0.24	0.19
2011	0.18	0.16	0.14	0.12	0.08	0.06	0.34	0.39	0.33	0.17	0.16	0.13
2012	0.10	0.09	0.07	0.04	0.02	0.01	0.32	0.45	0.51	0.30	0.25	0.24
2013	0.22	0.16	0.10	0.06	0.04	0.03	0.27	0.40	0.64	0.39	0.57	0.34
2014	0.33	0.28	0.21	0.14	0.10	0.16	0.39	0.46	0.57	0.47	0.34	0.26
2015	0.24	0.23	0.19	0.13	0.07	0.21	0.49	0.59	0.60	0.63	0.43	0.40

En la Figura 3.29 se muestran los valores de los  $I_e$  de las presas Sanalona, Adolfo López Mateos (Varejonal) y Luis Donaldo Colosio (Huites) para los períodos 1948-2015, 1964-2015 y 1995-2015, respectivamente. Se ilustra la variación histórica de  $I_e$ ; así como, los diferentes estados que adquiere según si el año o período fue húmedo, normal o seco. Los valores mayores a 0,50 indican una situación estable o de normalidad (color verde), los valores de  $I_e$  entre 0,30 y 0,50 indican un estado de prealerta (color amarillo), los valores de  $I_e$  entre 0,15 y 0,30 indican un estado de alerta (color naranja) y los valores de  $I_e$  menores a 0,15 indican un estado de emergencia (color rojo), de acuerdo con la Tabla 2.9 del capítulo anterior.

En la presa Sanalona se presentan las cuatro situaciones de estado en el período del año, por ejemplo: en los meses de estiaje, principalmente en el mes de mayo, se tiene emergencia, esto es debido a que los niveles de almacenamiento en el vaso se han abatido por la utilización del agua para riego (agrícola) en el DR 010 y aun no empieza la temporada de lluvia. No obstante, generalmente se presenta recuperación en los embalses durante los meses de julio a octubre, por lo que las situaciones van cambiando a alerta, prealerta y estabilidad. Luego, las precipitaciones disminuyen a partir de noviembre hasta la próxima temporada de lluvia que inicia en junio del siguiente año. En este intervalo las situaciones van cambiando conforme se presenta el período de estiaje a prealerta, alerta y de nuevo emergencia.

Los años de sequía agravan las situaciones, como las ocurridas en los períodos 2010-2012 y 1997-1999. Durante los años húmedos, la presa Sanalona presenta estados de prealerta a emergencia en los meses de enero a julio, normalizándose a partir del mes de agosto, volviendo a prealerta en el mes de noviembre. Los valores de  $I_e$  mínimos históricamente se presentaron en mayo de 1948, junio de 1951 y junio de 2012 siendo menores e iguales a 0,01. El efecto más severo históricamente de la sequía hidrológica en los almacenamientos de esta presa fue de enero a junio de 2012.

En la presa Varejonal, a diferencia de la presa Sanalona, no en todos los años se presentan todas las situaciones (estable, prealerta, alerta y emergencia en el año), sino más bien algunos años que la situación de la presa fluctúa de prealerta a estable y de estable a

prealerta, como por ejemplo el período de 1964-1969, 1972-1975, 1981-1986, 1991-1992, 2004-2006 y de agosto de 2014 a diciembre de 2015. Sobresalen años muy húmedos donde la presa se conserva en situación estable o de normalidad durante todo el año, como es el caso de los años 1968, 1973, 1985 y 2005. En el caso de años secos cuando se presentan situaciones de emergencia y alerta, los períodos son más cortos, destacando períodos con situaciones de alerta y emergencia como: marzo-septiembre de 1976, noviembre de 1977-septiembre de 1978, enero-septiembre de 1980, noviembre de 1987- julio de 1988, diciembre de 1994-agosto de 1996, marzo de 1998-agosto de 1999, diciembre de 1999-septiembre de 2000, diciembre de 2001-septiembre de 2003 y abril de 2011-agosto de 2013. Los períodos más secos con situaciones de prealerta a emergencia fueron: octubre de 1975-enero de 1979, diciembre de 1993-agosto de 2004 y noviembre de 2010-agosto de 2014. Los valores más pequeños de  $I_e$  fueron de 0,01 en los meses de mayo de 1996 y mayo-junio de 2012. En tanto la situación de emergencia más crítica se dio en los períodos enero-julio de 1996, enero-junio de 1999, enero-julio de 2003 y enero-julio de 2012.

En la presa Huites, con período de operación 1995-2015 (el más corto de las tres presas), se presentan situaciones de estado similar en su comportamiento al de la presa Sanalona. En la mayor parte del período se presentan situaciones de prealerta a emergencia en los meses de estiaje de enero a junio, iniciando su recuperación en el mes de julio, cambiando la situación a prealerta y estabilidad en julio y según el año, por lo general de julio a octubre la presa se encuentra en situación de estabilidad, regresando a situaciones de prealerta, alerta o emergencia por lo general a partir del mes de octubre. Las situaciones más críticas de emergencia se presentaron en los períodos de abril-junio de 1995, enero-junio de 1996, enero-mayo de 1999, marzo-junio de 2003, abril-junio de 2004, enero-junio de 2012, enero-junio de 2013 y abril-junio de 2014. El período más extenso de mayor estabilidad ocurrió de agosto de 2004-febrero de 2005. El período con mayores valores de  $I_e$  se presentaron en los períodos julio-octubre de 2008 con valores que fluctuaron entre 0,76 y 0,58, y julio-septiembre de 2015 con valores de  $I_e$  superiores a 0,6. El valor más pequeño de  $I_e$  se presentó en mayo de 1995 con 0,01. El mayor valor de  $I_e$  fue de 0,78 en el mes de septiembre de 2014.

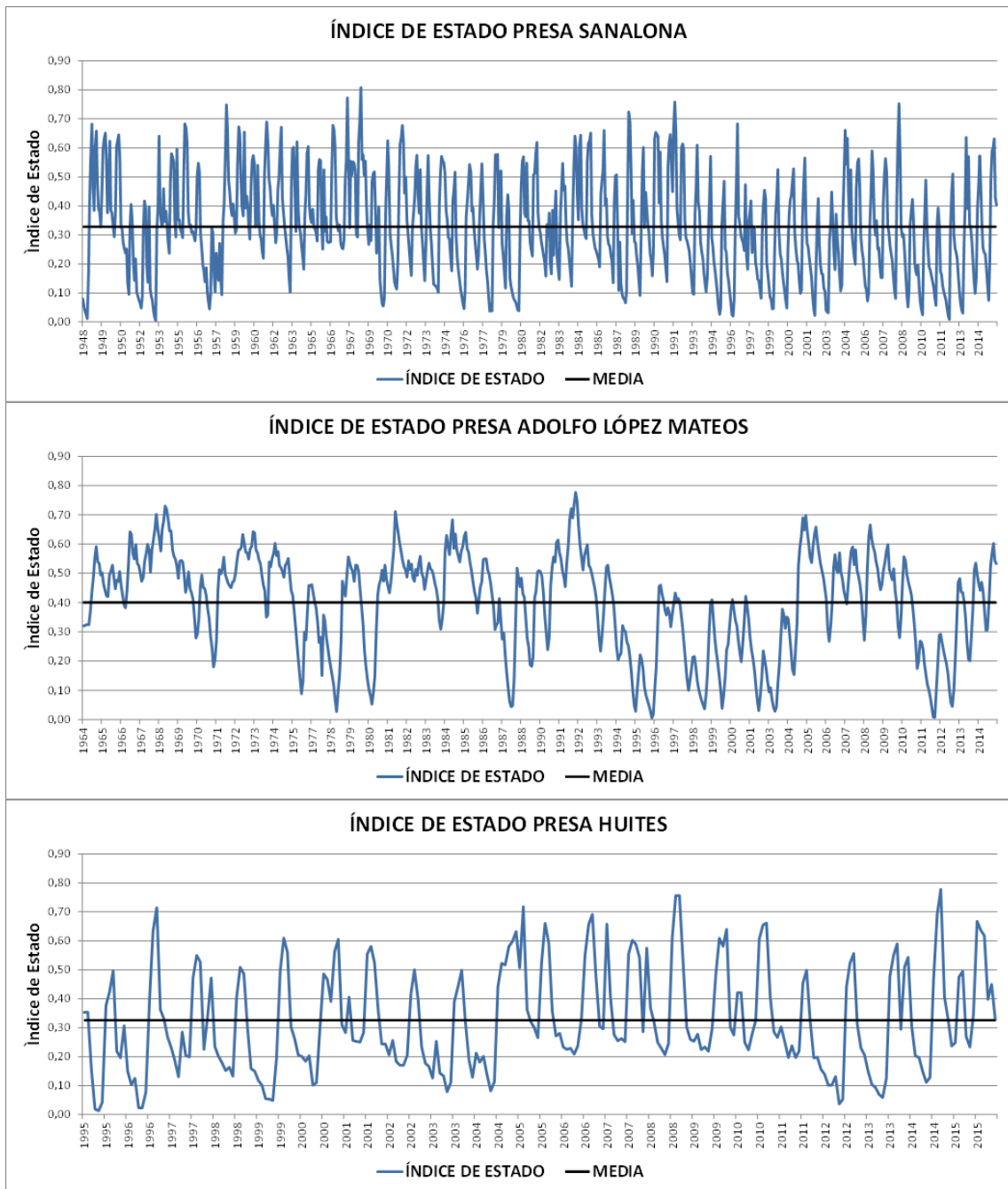


Figura 3.29. Variación del índice de Estado de Presas (Ie) en las presas Sanalona, Varejonal y Huites.

De acuerdo con los resultados del Ie mostrados en la Tabla 3.5 y Figura 3.29, en las presas del OCPN se presentan situaciones del estado de las presas diferentes para cada cuenca, por lo que cada caso se debe de analizar de manera particular. Entre los casos específicos de situaciones de emergencia más críticas se encuentran las producidas por la sequía del período 2011-2012, agravados en el período enero-julio de 2012. El año 2013

fue seco en los meses de enero a julio con recuperación a estabilidad a partir de agosto en las presas del norte, y en septiembre en las presas del centro-norte, terminando el año en situación de normalidad. En el año 2014, que se considera un año normal en términos pluviométricos y escurrimientos, en los primeros meses fue menos seco que sus similares del 2013, con recuperación a situación de estabilidad a partir del mes de agosto, terminando el año situación de prealerta a alerta. En cambio, el año 2015 considerado un año húmedo, su recuperación fue más temprana en el mes de julio, finalizando el año en situación de prealerta.

El análisis de la situación del estado de las presas del OCPN mes a mes puede ser un buen apoyo para la toma de decisiones en cuanto a políticas de operación de las presas y la planeación de los volúmenes de agua para sus diferentes usos aguas abajo, principalmente el uso agrícola, cuyo plan de riego utiliza el año correspondiente al ciclo agrícola, en este caso de octubre de un año a septiembre del año siguiente.

## **LA VARIABILIDAD HISTÓRICA DE LOS ÍNDICES DE SEQUÍAS (P, SPI, PDSI, Q, SDI, IE) Y SU RELACIÓN CON EL FENÓMENO DE EL NIÑO**

En esta sección se analiza el comportamiento de las variables de precipitación (P), escurrimiento (Q), índices de sequía meteorológicos (SPI, PDSI) e hidrológicos (SDI, IE) en los períodos de ocurrencia del fenómeno El Niño-Oscilación sur (ENSO) en sus fases positiva (El Niño) y negativa (La Niña) y la relación entre ellos, principalmente con los eventos extremos de inundaciones y sequías en el OCPN. Para el análisis se consideró el período de observación 1982-2015, ver Figura 3.30 (NOAA, 2017).



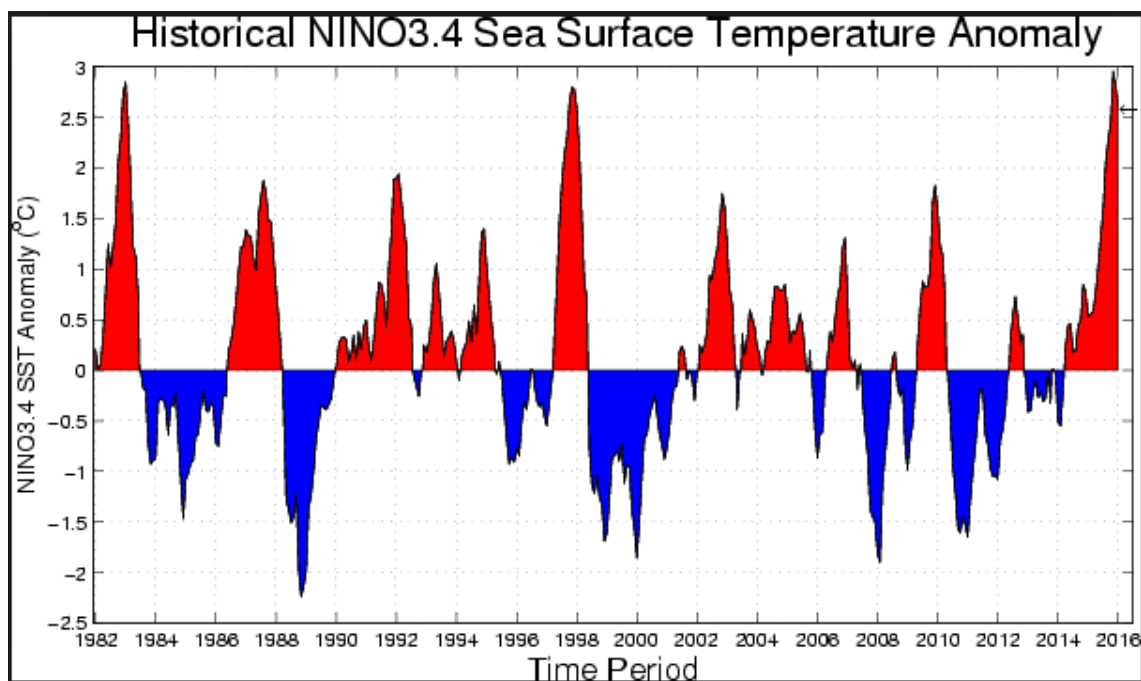


Figura 3.30. Anomalía de temperatura promedio histórica de la superficie del mar en °C (SST) de la región Niño 3.4 en el Pacífico Ecuatorial (NOAA, 2017).

Como indicador del fenómeno El Niño/La Niña (Berri, 1996; Landa *et al.*, 2008) se consideraron las anomalías de temperatura promedio de la superficie del mar (SST por sus siglas en inglés), de la región Niño 3.4 en el Pacífico Oriental en el Ecuador. De acuerdo con la escala de valores de la anomalía de temperatura (OMM, 2014; IRI, 2016) a partir de  $+0,5^{\circ}\text{C}$  se inicia la manifestación de El Niño en su fase positiva (línea de color rojo) y a partir de  $-0,5^{\circ}\text{C}$  hacia abajo se manifiesta el fenómeno en su fase negativa conocido como La Niña (línea de color azul). Asimismo, estos fenómenos se clasifican en diferentes rangos de desviación estándar (DE) de la serie de anomalías de la temperatura superficial del mar (SST). También las anomalías se expresan en términos  $^{\circ}\text{C}$ , si las anomalías son positivas se puede tener eventos Niño Débil, Moderado o Fuerte, en caso contrario se tendría Evento Niña Débil ( $-0,79^{\circ}\text{C}$  a  $-1,06^{\circ}\text{C}$ ), Niña Moderado ( $-1,07^{\circ}\text{C}$  a  $-1,33^{\circ}\text{C}$ ) y Niña Fuerte si es menor a ( $-1,33^{\circ}\text{C}$ ). (NOAA, 2017; IRI, 2016).

En la Figura 3.30 se observan anomalías de temperatura positivas sobresalientes en los períodos de abril de 1982 a julio de 1983, con valores máximos de  $2,79^{\circ}\text{C}$  en enero de 1983, y de mayo de 1997 a mayo de 1998, con valores máximos de  $2,69^{\circ}\text{C}$  en diciembre de 1997, que corresponden a la fase de El Niño Fuerte, siendo los eventos más intensos del

siglo pasado (Landa, 2008), y las del período enero de 2015 a junio de 2016, presentándose una intensidad máxima de 2,95 °C en noviembre de 2015, que es la máxima histórica dentro del período de registro (SMN, 2016; WMO, 2017). En cambio, en las anomalías negativas extremas sobresalen las ocurridas entre abril de 1988 y julio de 1989, siendo la más intensa con -2,38 °C en noviembre de 1988 (evento La Niña Fuerte), seguidos por eventos menos intensos pero algunos más importantes por su duración y efectos en la región del OCPN (Tabla 3.6), como los ocurridos entre mayo de 1998 y junio del año 2000, en donde se presentaron dos picos de intensidad máxima negativas, uno de -1,78 °C en diciembre de 1998 y la otro de -1,92 °C en enero de 2000. Entre julio 2007 y mayo 2008 con una intensidad máxima negativa de -1,89 °C en febrero de 2008; entre junio de 2010 y mayo 2011 con una anomalía máxima negativa de -1,68 °C, todos ellos considerados como eventos de La Niña Fuerte y finalmente, el evento de La Niña Moderado ocurrido entre octubre de 2010 y agosto 2011 a marzo de 2012, con un mínimo de -1,08 °C en enero de 2012.

Tabla 3.6. Eventos La Niña ocurridos en el período 1982-2015, indicando su intensidad.

UBICACIÓN HISTÓRICA DEL EVENTO	DURACIÓN DEL EVENTO LA NIÑA																								INTENSIDAD
	AÑO 1												AÑO 2												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
1984																									Fuerte
1988																									Fuerte
1995																									Debil
1998																									Fuerte
2000																									Fuerte
2007																									Fuerte
2010																									Moderado
2012																									Moderado

El evento de La Niña Fuerte que se presentó entre los años 1998 y 2000 coincide con la ocurrencia de la sequía meteorológica e hidrológica más severa históricamente que se tiene registrada en nuestra región (Douriet, 2010; Ravelo *et al.*, 2014; Sanz *et al.*, 2012; Torrecillas *et al.*, 2013), confirmando los resultados del monitoreo de sequías en las secciones anteriores de este trabajo. y las gráficas de precipitación, escurrimiento, índices de sequía meteorológica (SPI, PDSI) e hidrológicos (SDI, Ie) se presentan en las Figuras 3.31 a Figura 3.35, respectivamente; en donde las líneas continuas de color negro representan la variación histórica de SST, la de color naranja las variables climatológicas, de escurrimientos e índices, según corresponda; las normales mensuales de precipitación y

escurrimiento son representados por puntos de color azul; y el evento La Niña Moderada ocurrida entre 2010 y 2012, que coincidió con una de las sequías más severas de las últimas décadas que han afectado a toda la República Mexicana (SMN, 2016; Arreguín *et al.*, 2016), incluyendo al OCPN.

Los resultados del análisis muestran que no existe una relación directa entre la variabilidad climática y el fenómeno ENSO, tanto en la fase positiva (El Niño) como en la negativa (La Niña), como lo indican los valores del Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) entre la variable climatológica de precipitación e índices de sequía meteorológica SPI3 y PDSI de las estaciones Culiacán, El Comedero, El Varejonal, Guamúchil, Huites y Sanalona Vs las Anomalías de SST (Tabla 3.7) con valores en todos los casos menores a 0,1. Por otra parte, la correlación entre la variable hidrológica de escurrimiento e índices de sequía hidrológica SDI e Ie de las presas Adolfo López Mateos (ALM), Aurelio Benassini (AB), Eustaquio Buelna (EB), Gustavo Díaz Ordaz (GDO), José López Portillo (JLP), Luis Donaldo Colosio (LDC) y Sanalona (SAN) Vs Anomalías de SST (Tabla 3.8) en todos los casos son menores a 0,04. No son significativos.

Tabla 3.7: Valores de  $R^2$  de variables e índices meteorológicos Vs anomalías de El Niño en estaciones climatológicas del OCPN, período 1982-2015.

<b>Valor de <math>R^2</math> de variables e índices meteorológicos Vs las Anomalías de El Niño</b>						
<b>Índices Meteorológicos</b>	<b>Estación Climatológica</b>					
	<b>Culiacán</b>	<b>El Comedero</b>	<b>El Varejonal</b>	<b>Guamúchil</b>	<b>Huites</b>	<b>Sanalona</b>
<b>Precipitación</b>	0,00813	0,00646	0,00632	0,00244	0,01276	0,00542
<b>PDSI</b>	0,07447	0,09891	0,06230	0,02252	0,05903	0,05939
<b>SPI 3</b>	0,06816	0,05515	0,06612	0,02557	0,09550	0,06200

Tabla 3.8: Valores de  $R^2$  de variables e índices hidrológicos Vs anomalías de El Niño en estaciones climatológicas del OCPN, período 1982-2015.

<b>Valor de <math>R^2</math> de las variables e índices hidrológicos Vs las Anomalías de El Niño</b>							
<b>Índices Hidrológicos</b>	<b>Presas</b>						
	<b>ALM</b>	<b>AB</b>	<b>EB</b>	<b>GDO</b>	<b>JLP</b>	<b>LDC</b>	<b>SAN</b>
<b>Escurrecimiento</b>	0,00831	0,00243	0,00155	0,00628	0,01081	0,00553	0,00274
<b>SDI</b>	0,03307	0,00152	0,01378	0,03305	0,03097	0,02165	0,01886

Nomenclatura: ALM (Adolfo López Mateos), AB (Aurelio Benassini), EB (Eustaquio Buelna), GDO (Gustavo Díaz Ordaz), JLP (José López Portillo), LDC (Luis Donaldo Colosio) y SAN (Sanalona)

Estos resultados de muy baja correlación entre la variabilidad climática y del fenómeno El Niño indican una baja predictibilidad de los efectos del fenómeno a escalas locales y regionales en el OCPN, coincidiendo con lo encontrado por otros investigadores en México (Magaña, 2002) y en otros países del mundo, como por ejemplo Argentina (García, 2012). Lo anterior refuerza el hecho de que si bien el fenómeno El Niño influye en la variabilidad climática y de escurrimientos en nuestra región, no es el único forzante en la ocurrencia de las sequías, sino que este fenómeno depende de muchos otros factores o forzantes como la interacción océano-atmósfera-tierra, comportamiento de la zona de convergencia intertropical, corrientes marinas en los océanos atlántico e índico y Ondas del Este (Magaña, 2004), los ciclones tropicales (SMN, 2016), comportamiento del Monzón Mexicano (UNAM, 2017) y manchas solares entre otros (Velasco, 2002; Landa *et al.*, 2008).

En contraparte, un análisis detallado del comportamiento de la variabilidad climática y de escurrimientos en el OCPN para eventos del fenómeno de El Niño (Anexo 3) nos indica que la ocurrencia de sequías en esta región en sus diferentes fases es independiente de la intensidad y fase en que se encuentre el fenómeno ENSO; sin embargo, se ha encontrado que cuando el fenómeno se encuentra en fase negativa (La Niña) con intensidades negativas menores a  $-1,07\text{ }^{\circ}\text{C}$  (eventos de Niñas moderadas y Fuertes) las probabilidades de ocurrencia de sequías meteorológicas en sus fases de incipiente a extrema es alta y si la intensidad es menor a  $-1,33\text{ }^{\circ}\text{C}$  (eventos de Niñas Fuerte) y su duración es mayor a un año las probabilidades de ocurrencia de sequías meteorológicas e hidrológicas en sus fases fuerte y extrema crece a muy alta; coincidiendo con lo determinado por otros autores en que el efecto del fenómeno de El Niño en las sequías en México debe de manejarse como probabilidad de ocurrencia (Magaña *et al.*, 2004; Landa *et al.*, 2008).

Si bien no podemos pronosticar los efectos del Niño en el OCPN, si podemos considerar que a partir de cierto nivel de intensidad y duración habrá efectos por sequías meteorológicas e hidrológicas como consecuencia de la inhibición del Monzón Mexicano por efectos de El Niño.

Lo anterior sugiere la posibilidad de considerar las anomalías de SST de la zona 3.4 como un indicador de tendencia de sequía hasta de 6 meses en el sentido de si habrá o no sequía y que probabilidad de ocurrencia que se presente una sequía extrema, lo cual puede ser útil para efectos de planeación y de alerta temprana. Si bien no existe una buena correlación entre la variabilidad climática y de escurrimientos con el índice SST el uso de las redes neuronales nos puede establecer rangos apropiados de predictibilidad en un sentido general y una investigación más profunda nos puede dar un camino para pronosticar las sequías hasta seis meses.

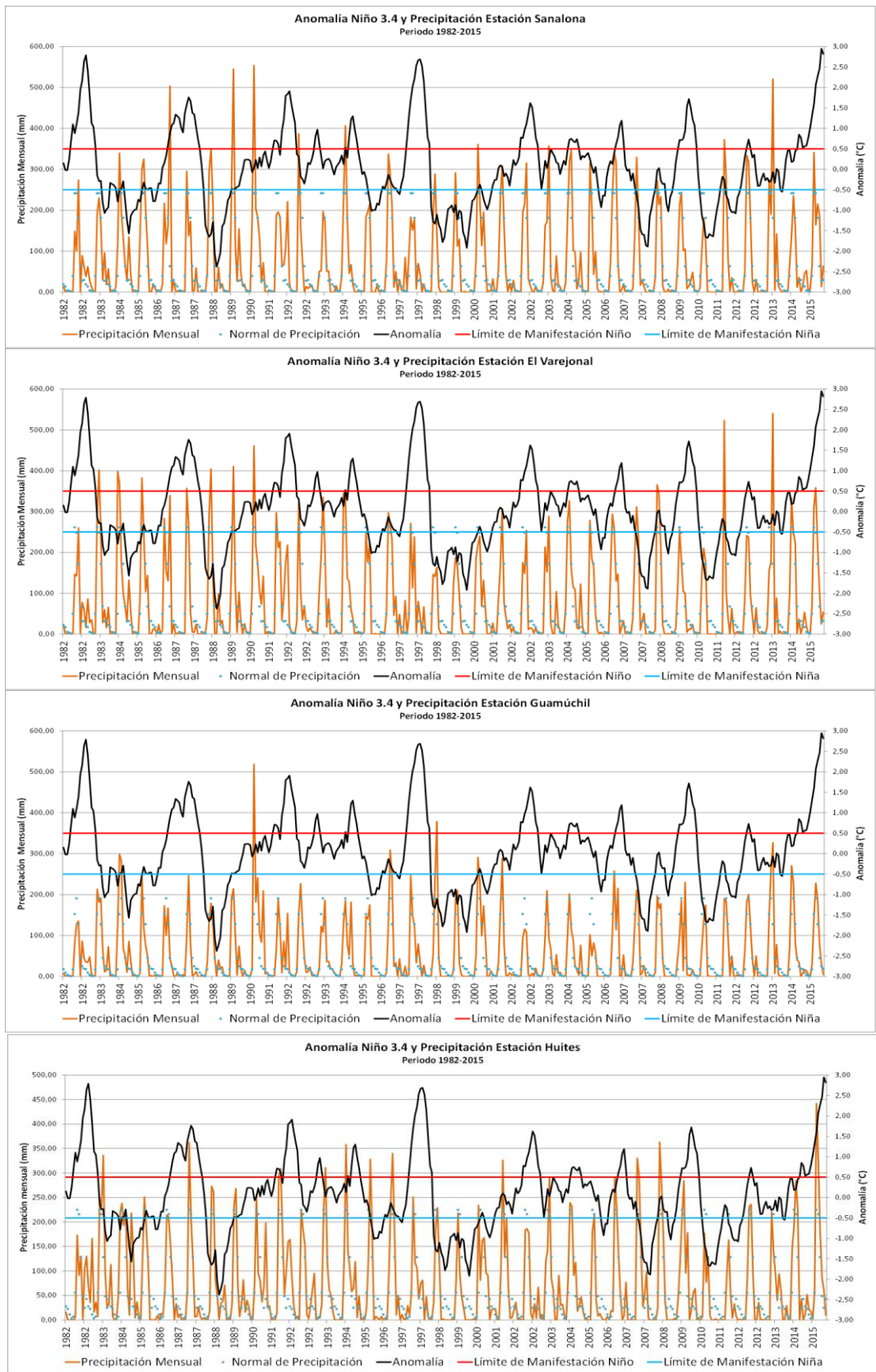


Figura 3.31. Anomalías de Temperatura (°C) y precipitación en las estaciones Sanalona, Varejonal, Guamúchil y Huites; período 1982-2015.

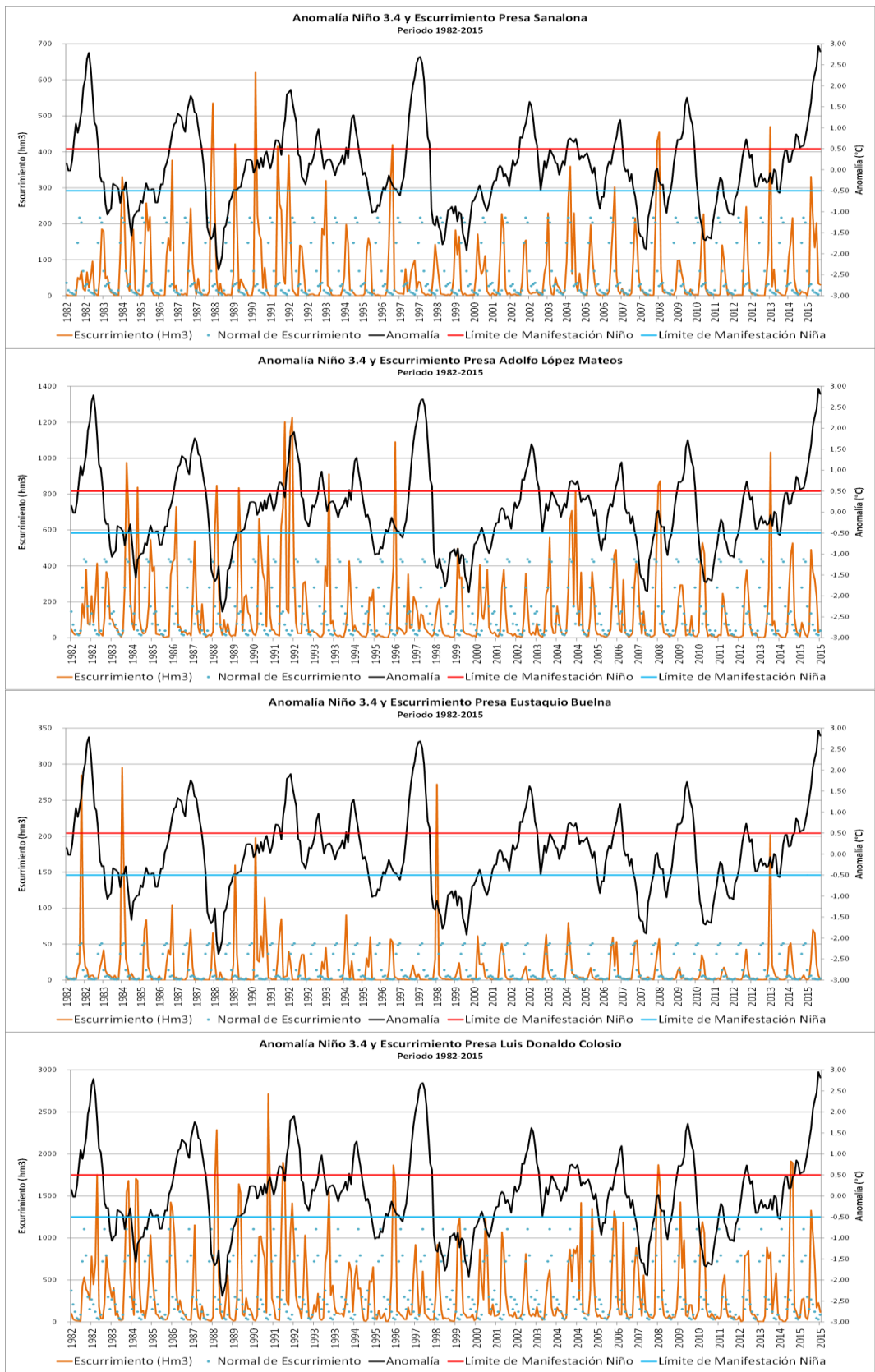


Figura 3.32. Anomalías de Temperatura (°C) y escurrimientos en las presas Sanalona, Adolfo López Mateos, Eustaquio Buelna y Luis Donaldo Colosio; período 1982-2015.

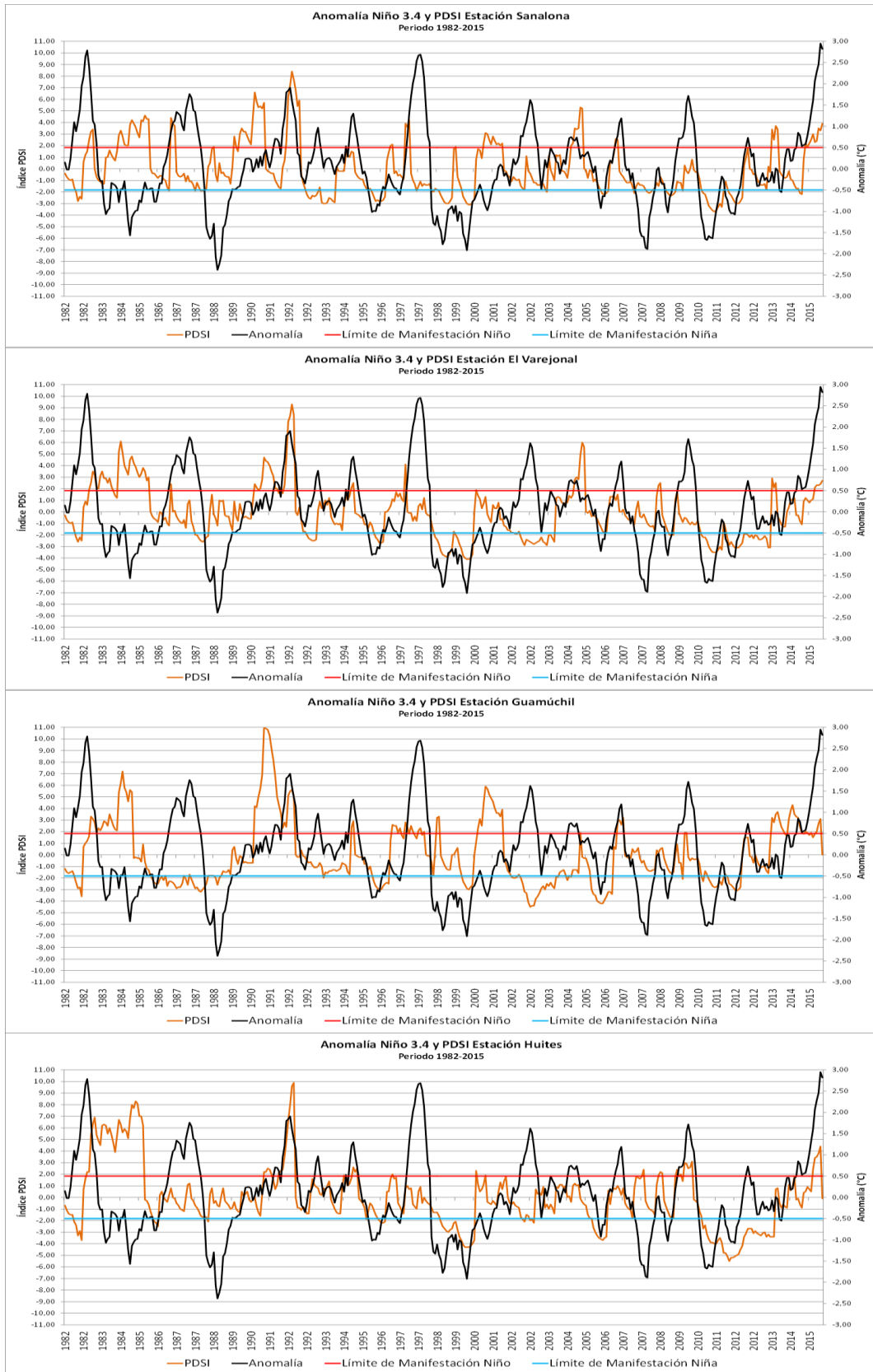


Figura 3.33. Anomalías de Temperatura de la superficie del mar SST (°C) y PDSI en las estaciones Sanalona, El Varejonal, Guamúchil y Huites; período 1982-2015.



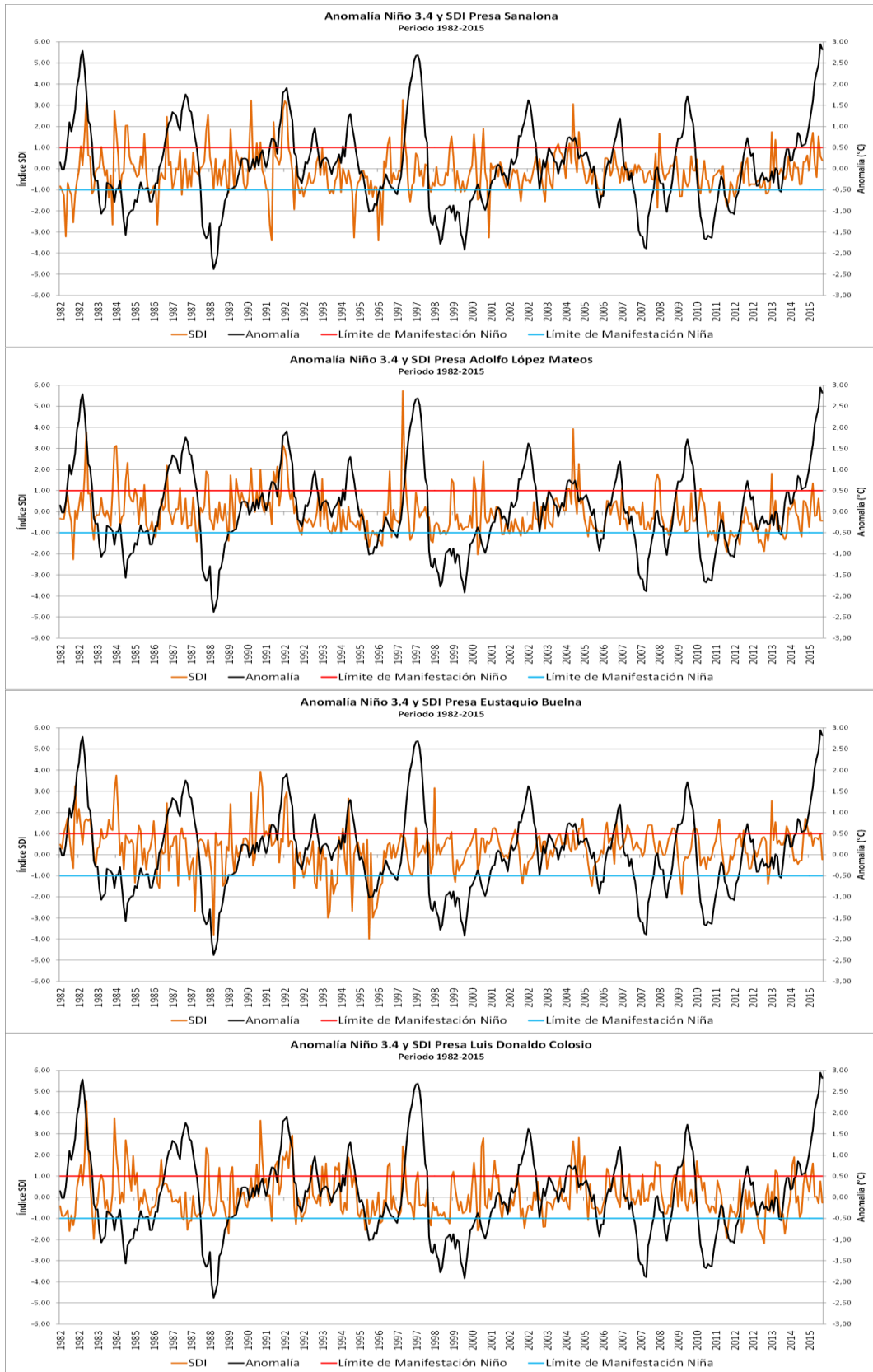


Figura 3.34. Anomalías de Temperatura de la superficie del mar SST (°C) Vs SDI en las presas Sanalona, Adolfo López Mateos, Eustaquio Buelna y Luis Donaldo Colosio; período 1982-2015.

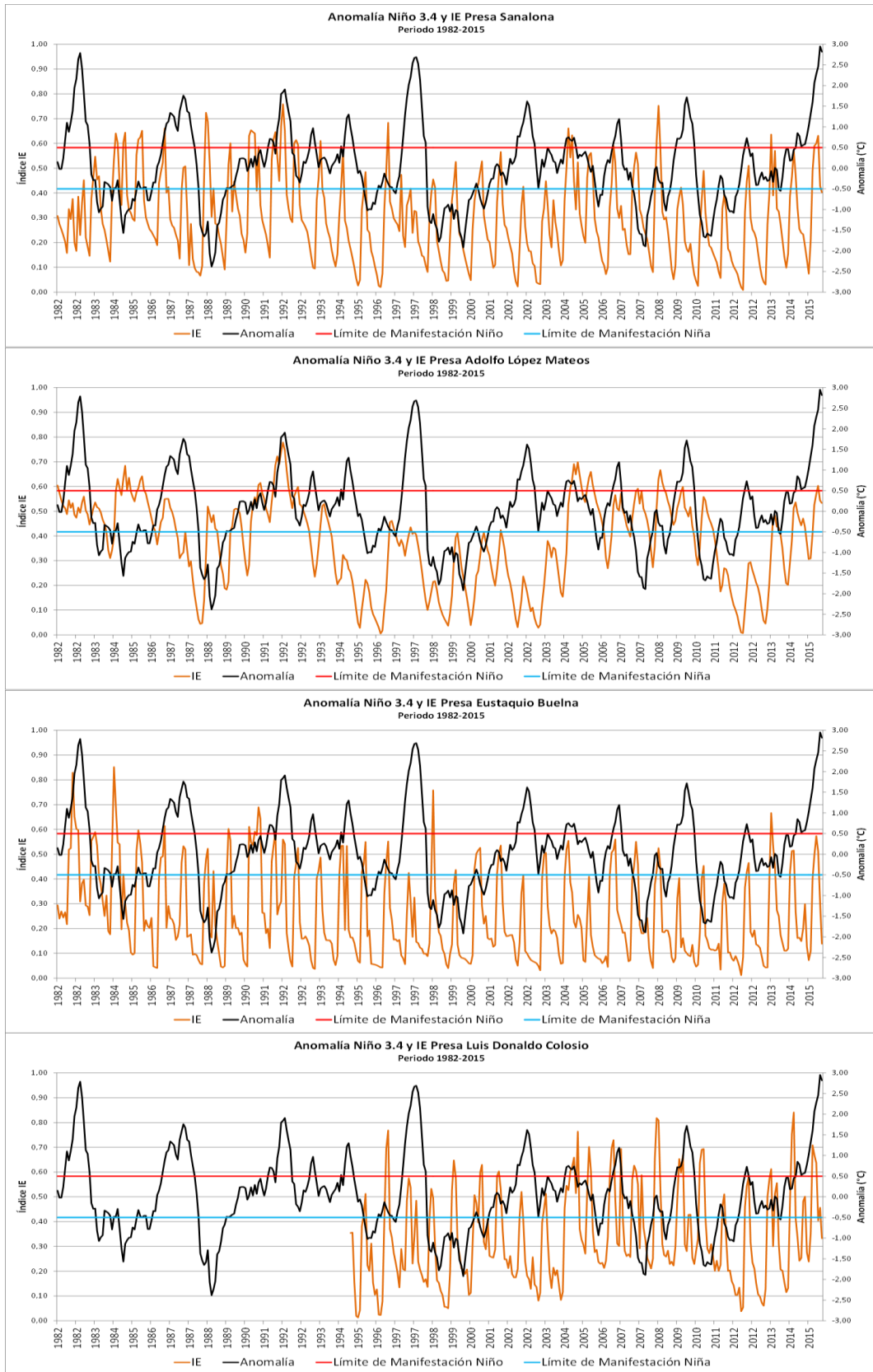


Figura 3.35. Anomalías de Temperatura de la superficie del mar SST (°C) Vs Ie en las presas Sanalona, Adolfo López Mateos, Eustaquio Buelna y Luis Donaldo Colosio; período 1982-2015.

## **PRONÓSTICO TEMPORAL Y ESPACIAL DE LAS SEQUÍAS METEOROLÓGICAS**

En el caso de ocurrencia de sequías generalizadas y para los fines de una administración adecuada del agua disponible en las presas, es importante disponer de un pronóstico de las condiciones hídricas para los próximos meses (Ravelo *et al.*, 2012).

En esta sección se describen los resultados del pronóstico y análisis multivariado temporal y espacial de las sequías meteorológicas e hidrológicas en el OCPN, mediante el uso generalizado de las redes neuronales, variables climatológicas y de escurrimiento e índices de sequía, obtenidos conforme a las metodologías descritas en el capítulo anterior.

### **PRONÓSTICO DE SEQUÍAS METEOROLÓGICAS**

En esta sección se describe los resultados del pronóstico temporal y espacial de las sequías meteorológicas, mediante la aplicación de redes neuronales a los índices SPI y PDSI en el Organismo de Cuencas del Pacífico Norte (OCPN).

El pronóstico de las sequías meteorológicas fue realizado con redes neuronales que utilizan como datos de entrada a los índices de sequía históricos y los resultados validados estadísticamente mediante el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), coeficiente de concordancia de Willmott (d), Error Absoluto Medio (MAE), Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Porcentaje del Error Cuadrático Medio (% de RMSE). La cartografía de los índices fue automatizada mediante la aplicación de los programas SOS y la aplicación del ArcMap del ARGIS 10.2 a partir de los resultados puntuales del pronóstico de los índices por localidad.

#### **Pronóstico temporal a 1, 2 y 3 meses**

Para el pronóstico de los índices meteorológicos SPI y PDSI se consideraron las series históricas de los índices SPI y PDSI, desde 1978 hasta al año y mes anterior al pronóstico; a partir de dicho mes se pronosticaron los índices a uno, dos y tres meses siguientes. Los resultados indican para ambos indicadores que, invariablemente el pronóstico a un mes fue mejor que el de dos meses y el de dos meses mejor que el de tres meses, como lo muestran los resultados de los pronósticos para el año 2015 en las Tablas 3.9 y 3.10 en el caso del índice SPI3 y Tablas 3.11 y 3.12 para el índice PDSI.

## Índice SPI

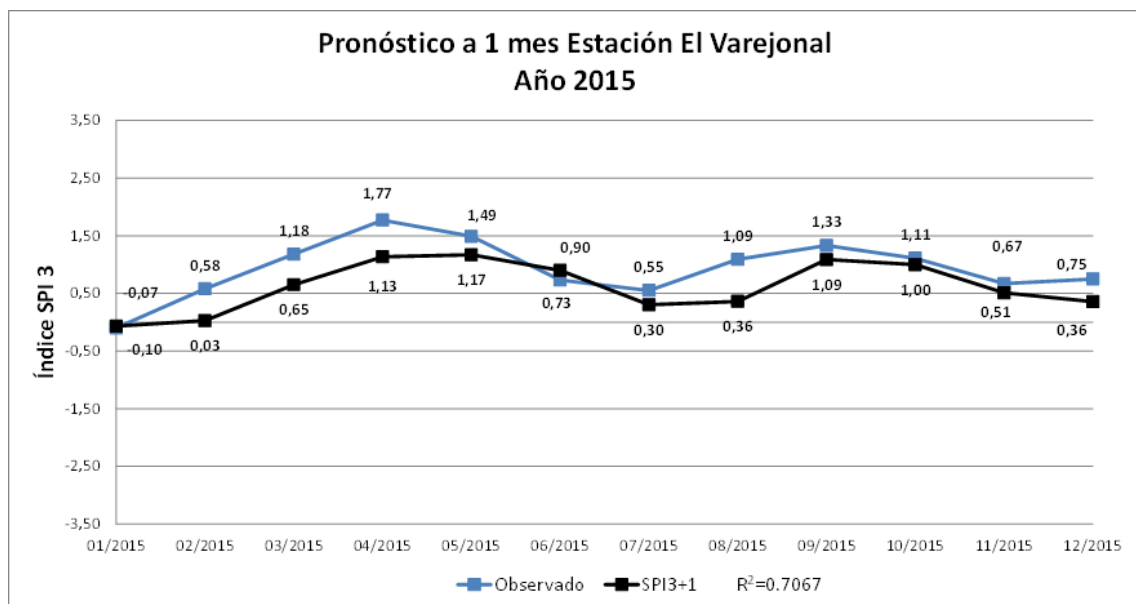
En la Tabla 3.9 y Figura 3.36 se presenta el pronóstico de la sequía meteorológica para la localidad de El Varejonal mediante el índice SPI3 para todos los meses del año 2015, se realizó en enero para los meses de febrero, marzo y abril; en febrero para los meses marzo, abril y mayo, y así sucesivamente hasta diciembre donde se pronosticó para los meses de enero, febrero y marzo de 2016. La precisión del pronóstico para los tres meses siguientes fue realizada en enero y verificada en febrero para el primer mes, en marzo para el segundo mes y en abril para el tercer mes.

Tabla 3.9. Pronóstico del SPI3 a 1, 2 y 3 meses de la estación Varejonal, año 2015.

Estación El Varejonal					
Año	Mes	Índice SPI 3			
2015	Enero	Mes	Febrero	Marzo	Abril
		Pronóstico	0,03	0,15	0,23
		Observado	-0,10	0,58	1,18
	Febrero	Mes	Marzo	Abril	Mayo
		Pronóstico	0,65	0,60	0,28
		Observado	1,18	1,77	1,49
	Marzo	Mes	Abril	Mayo	Junio
		Pronóstico	1,13	0,72	0,35
		Observado	1,77	1,49	0,73
	Abril	Mes	Mayo	Junio	Julio
		Pronóstico	1,17	0,60	0,24
		Observado	1,49	0,73	0,55
	Mayo	Mes	Junio	Julio	Agosto
		Pronóstico	0,90	0,38	0,21
		Observado	0,73	0,55	1,09
	Junio	Mes	Julio	Agosto	Septiembre
		Pronóstico	0,30	0,37	0,60
		Observado	0,55	1,09	1,33
	Julio	Mes	Agosto	Septiembre	Octubre
		Pronóstico	0,36	0,39	0,27
		Observado	1,09	1,33	1,11

Cont... Tabla 3.9: Pronóstico del SPI3 a 1, 2 y 3 meses de la estación Varejonal, año 2015.

Estación El Varejonal					
Año	Mes	Índice SPI 3			
2015	Agosto	Mes	Septiembre	Octubre	Noviembre
		Pronóstico	1,09	0,93	0,47
		Observado	1,33	1,11	0,67
	Septiembre	Mes	Octubre	Noviembre	Diciembre
		Pronóstico	1,00	0,42	0,18
		Observado	1,11	0,67	0,75
	Octubre	Mes	Noviembre	Diciembre	Enero
		Pronóstico	0,51	0,18	0,19
		Observado	0,67	0,75	0,67
	Noviembre	Mes	Diciembre	Enero	Febrero
		Pronóstico	0,36	0,41	0,55
		Observado	0,75	0,67	0,68
Diciembre	Mes	Enero	Febrero	Marzo	
	Pronóstico	0,67	0,68	0,46	
	Observado	0,38	0,37	-0,34	



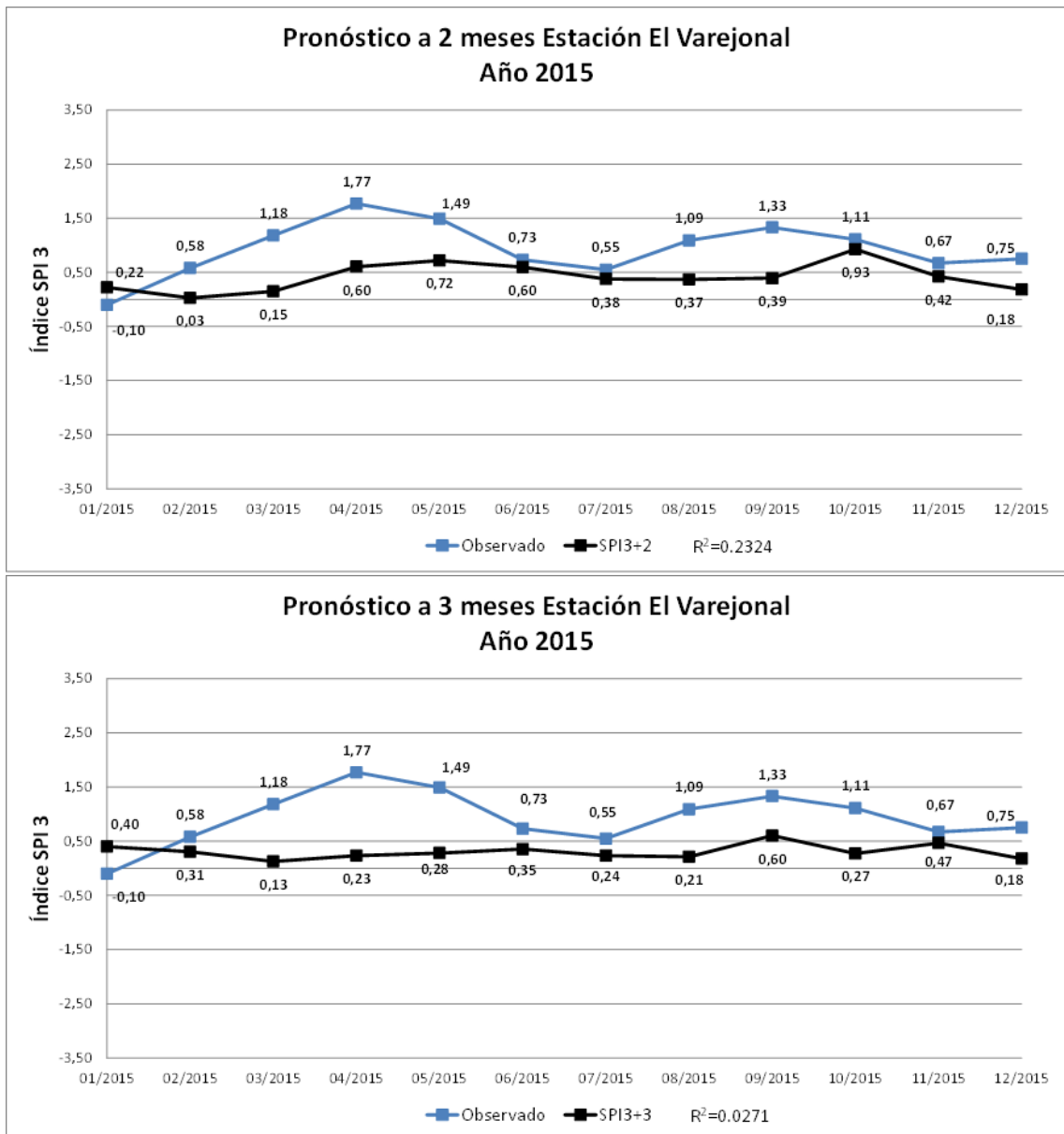


Figura 3.36. Pronóstico de SPI3 a 1, 2 y 3 meses en la estación El Varejón para el año 2015.

Puede apreciarse que para el primer mes existe una pequeña diferencia entre el valor pronosticado del SPI3 para febrero en el mes anterior y el calculado con los datos del mes de febrero, quedando en fase de normalidad hídrica para los meses de estiaje de febrero a mayo. La diferencia entre lo pronosticado y lo observado se incrementa un poco quedando algunos de ellos en fases de sequía diferentes; vuelven a ser similares en junio y julio, incrementando la brecha en los meses de agosto y septiembre que son los más lluviosos del año; en octubre y noviembre la diferencia es pequeña quedando ambos en la fase de humedad moderada e incipiente, respectivamente. Finalmente en diciembre de 2015 y

enero de 2016, la brecha se incrementa de nuevo. Las tendencias entre lo observado y lo pronosticado a un mes son muy similares siendo mayor el valor observado que el pronosticado en este intervalo de tiempo, por lo que el pronóstico quedo subestimado. El pronóstico a dos y tres meses presentaron una mayor brecha siendo más grande conforme el pronóstico era a tres meses.

La verificación de la precisión de los pronósticos se presenta en la Tabla 3.10. Se debe destacar que el Coeficiente de Determinación más alto ocurrió en el pronóstico a un mes en la estación El Varejonal con 0,7067. En las otras estaciones, en cambio, los valores del coeficiente de determinación fueron menores a 0,54. El coeficiente de determinación para el pronóstico a dos y tres meses fue de bajo a muy bajo con valores menores a 0,42 a dos meses y menores a 0,20 a tres meses. Estos valores del coeficiente de determinación indican bajo grado de asertividad en el pronóstico de los índices de sequía SPI3 a uno, dos y tres meses usando redes neuronales de una sola capa de entrada con una de salida. A excepción de algunas estaciones como El Varejonal que tienen buen pronóstico a un mes, la precisión en general no es adecuada a dos y tres meses. Los otros estimadores de error como  $d$ , MAE, RMSE y %RMSE entre los índices pronosticados y los observados ocurridos así lo confirman. En los últimos años se han desarrollado trabajos con resultados similares a los obtenidos por los investigadores Serio *et al.* (2010) en la evaluación de la precisión del SPI y Ravelo *et al.*, (2014) en la evaluación de la precisión del PDSI como indicadores de la ocurrencia de sequías. Existen otros observatorios que llevan a cabo pronósticos estacionales a un mes mediante el SPI pero a macroescala (UE, 2017; CIIFEN, 2017) lo cual no tiene precisión local y deben utilizar resultados de los pronósticos de modelos a escalas regionales y locales, que han probado un buen grado de asertividad, como los de la presente investigación.

Tabla 3.10. Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), coeficiente de concordancia (d) y errores absoluto medio (MAE), cuadrático medio (MRSE) y porcentaje del cuadrático medio (%MRSE) entre valores calculados y pronosticados del SPI3 mensual para las localidades Culiacán, Sanalona, El Varejonal y Huites para el año 2015 (n=12).

Fecha	Índice SPI 3 Estación El Varejonal				Índice SPI 3 Estación Culiacán				Índice SPI 3 Estación Sanalona				Índice SPI 3 Estación Huites			
	Obs.	SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3	Obs.	SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3	Obs.	SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3	Obs.	SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3
ene-15	-0,10	-0,07	0,22	0,40	0,05	0,33	-0,02	-0,04	-0,01	-0,08	-0,30	0,04	0,04	-0,47	0,50	0,36
feb-15	0,58	0,03	0,03	0,31	0,32	0,11	0,42	0,15	0,52	0,04	-0,03	-0,26	0,20	-0,02	-0,55	0,42
mar-15	1,18	0,65	0,15	0,13	1,00	-0,05	-0,23	0,09	1,51	0,63	0,09	0,02	0,72	0,63	0,20	-0,15
abr-15	1,77	1,13	0,60	0,23	1,64	0,78	-0,16	-0,31	2,22	1,44	0,59	0,08	1,32	0,56	0,50	0,22
may-15	1,49	1,17	0,72	0,28	1,77	1,49	0,73	-0,19	2,79	1,78	1,11	0,39	1,27	1,20	0,45	0,32
jun-15	0,73	0,90	0,60	0,35	0,70	1,40	1,14	0,43	1,01	1,95	0,95	0,52	0,55	1,02	0,93	0,25
jul-15	0,55	0,30	0,38	0,24	-0,28	0,28	0,94	0,73	1,14	0,10	1,07	0,15	1,71	0,20	0,65	0,57
ago-15	1,09	0,36	0,37	0,21	0,42	-0,41	0,09	0,62	0,43	0,36	-0,28	0,34	2,05	1,53	0,00	0,48
sep-15	1,33	1,09	0,39	0,60	0,66	0,48	-0,18	0,30	0,40	0,47	0,40	0,05	2,19	1,72	1,60	0,13
oct-15	1,11	1,00	0,93	0,27	1,89	0,88	0,67	0,18	0,62	0,19	0,28	0,37	1,44	1,39	1,01	0,95
nov-15	0,67	0,51	0,42	0,47	1,48	1,36	0,64	0,43	1,07	0,58	-0,01	0,14	1,33	0,90	0,91	0,53
dic-15	0,75	0,36	0,18	0,18	1,69	1,07	1,04	0,40	1,29	0,92	0,50	-0,04	0,72	0,98	0,56	0,61
CDE	$R^2$	0,7067	0,2324	0,0271	$R^2$	0,3947	0,0183	0,1958	$R^2$	0,5346	0,4180	0,0415	$R^2$	0,5346	0,4180	0,0415
	d	0,8157	0,5447	0,4147	d	0,7371	0,4261	0,3551	d	0,7867	0,6043	0,4454	d	0,7867	0,6043	0,4454
	MAE	0,3440	0,5671	0,7070	MAE	0,5581	0,8152	0,9149	MAE	0,5518	0,7187	0,9405	MAE	0,5518	0,7187	0,9405
	RMSE	0,4049	0,6638	0,8096	RMSE	0,6447	0,9565	1,1356	RMSE	0,6560	0,9264	1,1976	RMSE	0,6560	0,9264	1,1976
	%RMSE	43,5788	71,4417	87,1361	%RMSE	68,2192	101,2190	120,1713	%RMSE	60,6039	85,5804	110,6371	%RMSE	60,6039	85,5804	110,6371

## Índice PDSI

En la Tabla 3.11 y Figura 3.37 se presenta el pronóstico de la sequía meteorológica para la localidad de El Varejonal mediante el índice PDSI para todos los meses del año 2015. Se realizó en enero para los meses de febrero, marzo y abril; en febrero para los meses marzo, abril y mayo, y así sucesivamente hasta diciembre donde se pronosticó para los meses de enero, febrero y marzo de 2016. La precisión del pronóstico para los tres meses siguientes fue realizada en enero y verificada en febrero para el primer mes, en marzo para el segundo mes y en abril para el tercer mes.

Puede apreciarse que para el primer mes existe una pequeña diferencia entre el valor pronosticado para marzo en el mes anterior y el calculado con los datos del mes de marzo; de igual manera con todos los meses a excepción de los meses febrero y agosto; en febrero inicia el estiaje por lo que los volúmenes de escurrimiento no son tan importantes, sin embargo se manifiesta desde el inicio del año la presencia de un año húmedo, ya que se pronosticó una sequía incipiente y en realidad se observaron condiciones de normalidad hídrica; en el mes de agosto el pronóstico fue de fase de sequía incipiente y se presentó sequía moderada, en ambos casos la humedad que se presentó en la realidad fue superior a



la pronosticada. En el resto de los meses del año el pronóstico para un mes fue de alta asertividad ya que la diferencia entre lo pronosticado y lo estimado fue muy pequeña. En cambio, el pronóstico para dos y tres meses siguientes también fue acertado en la mayoría de los meses, a excepción de febrero, marzo, agosto y septiembre en el pronóstico a dos meses y febrero, marzo, abril, agosto, septiembre y octubre en el pronóstico a tres meses.

Tabla 3.11. Pronóstico del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) a 1, 2 y 3 meses de la estación Varejonal, año 2015.

Estación El Varejonal					
Año	Mes	Índice PDSI			
2015	Enero	Mes	Febrero	Marzo	Abril
		Pronostico	-1.07	-1.12	-1.10
		Observado	0.90	1.20	1.00
	Febrero	Mes	Marzo	Abril	Mayo
		Pronostico	0.94	0.90	0.97
		Observado	1.20	1.00	0.80
	Marzo	Mes	Abril	Mayo	Junio
		Pronostico	1.19	1.27	1.29
		Observado	1.00	0.80	1.00
	Abril	Mes	Mayo	Junio	Julio
		Pronostico	0.98	0.96	1.10
		Observado	0.80	1.00	1.00
	Mayo	Mes	Junio	Julio	Agosto
		Pronostico	0.75	0.86	0.85
		Observado	1.00	1.00	2.00
	Junio	Mes	Julio	Agosto	Septiembre
		Pronostico	1.08	1.07	1.06
		Observado	1.00	2.00	2.30
	Julio	Mes	Agosto	Septiembre	Octubre
		Pronostico	1.03	1.05	1.05
		Observado	2.00	2.30	2.30
	Agosto	Mes	Septiembre	Octubre	Noviembre
		Pronostico	2.05	2.00	2.01
		Observado	2.30	2.30	2.40
	Septiembre	Mes	Octubre	Noviembre	Diciembre
		Pronostico	2.23	2.24	2.14
		Observado	2.30	2.40	2.70
	Octubre	Mes	Noviembre	Diciembre	Enero
		Pronostico	2.42	2.44	2.49
		Observado	2.40	2.70	-0.30
	Noviembre	Mes	Diciembre	Enero	Febrero
		Pronostico	2.39	2.46	2.51
		Observado	2.70	-0.30	-0.60
	Diciembre	Mes	Enero	Febrero	Marzo
		Pronostico	2.58	2.49	2.43
		Observado	-0.30	-0.60	-0.50

La verificación de la precisión de los pronósticos se presenta en la Tabla 3.12. Se debe destacar que el Coeficiente de Determinación es superior a 0,70 para pronósticos a 1 mes en las estaciones Culiacán y Sanalona, y el Coeficiente de Concordancia es mayor a 0,8 en las estaciones Culiacán, Sanalona y Varejonal, localizadas en la zona centro del OCPN; en cambio para la estación Huites, localizada en la zona norte del Organismo, el Coeficiente de Determinación es muy bajo con valores inferiores a 0,4 y el Coeficiente de Concordancia es alto superior a 0,8; para los pronósticos a 2 y 3 meses los coeficientes de Determinación son menores a 0,46. Los coeficientes altos indican una buena correlación entre el índice de sequía calculado con los datos del mes y el valor pronosticado mediante las redes neuronales. Los errores entre el valor calculado y el pronosticado no superan los límites de la clase de sequía, excepto para la localidad de Huites y para pronósticos a 2 y 3 meses. Esto significa que si bien hay diferencias numéricas entre ambos valores, el pronóstico corresponde a la misma clase de sequía que el índice calculado para ese mes. En la última década, resultados similares fueron obtenidos por otros investigadores Serio *et al.* (2010) en la evaluación de la precisión del SPI y Ravelo *et al.*, (2014) en la evaluación de la precisión del PDSI como indicadores de la ocurrencia de sequías.

Tabla 3.12: Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), coeficiente de concordancia (d) y errores y errores absoluto medio (MAE), cuadrático medio (MRSE), d y porcentaje del cuadrático medio (%MRSE) entre valores calculados y pronosticados del PDSI mensual para las localidades Culiacán, Sanalona, El Varejonal y Huites para el año 2015 (n=12).

Fecha	Índice PDSI Estación El Varejonal				Índice PDSI Estación Culiacán				Índice PDSI Estación Sanalona				Índice PDSI Estación Huites			
	Obs.	PDSI+1	PDSI+2	PDSI+3	Obs.	PDSI+1	PDSI+2	PDSI+3	Obs.	PDSI+1	PDSI+2	PDSI+3	Obs.	PDSI+1	PDSI+2	PDSI+3
ene-15	-1,10	-0,85	-0,21	-0,43	1,10	-0,84	1,99	2,11	-2,20	-1,94	-1,42	-1,39	-0,90	-0,65	-0,66	-0,33
feb-15	0,90	-1,07	-0,82	-0,21	0,40	-1,69	-1,37	1,79	0,80	-2,11	-1,75	-1,32	0,40	-0,89	-0,77	-0,67
mar-15	1,20	0,94	-1,12	-0,92	0,80	0,38	-1,83	-1,54	2,20	1,18	-1,83	-1,56	0,50	0,23	-1,07	-0,78
abr-15	1,00	1,19	0,90	-1,10	0,60	0,86	0,28	-1,90	1,90	2,58	1,38	-1,57	0,90	0,17	0,09	-1,03
may-15	0,80	0,98	1,27	0,97	0,40	0,61	0,87	0,13	2,20	1,82	2,53	1,08	0,70	0,90	0,13	-0,08
jun-15	1,00	0,75	0,96	1,29	0,50	0,15	0,46	0,71	2,50	2,22	1,68	2,57	0,50	0,72	0,88	0,00
jul-15	1,10	1,08	0,86	1,10	0,00	0,51	0,11	0,49	3,00	2,41	2,08	2,09	2,40	0,26	0,62	0,85
ago-15	2,10	1,03	1,07	0,85	0,60	-0,22	0,37	0,00	2,30	2,87	2,34	1,76	3,40	2,10	0,08	0,63
sep-15	2,30	2,05	1,05	1,06	1,10	0,56	-0,48	0,15	2,40	1,92	2,56	2,06	3,50	3,58	2,06	-0,20
oct-15	2,30	2,23	2,00	1,05	3,50	1,05	0,42	-0,76	3,50	2,21	1,57	2,26	3,80	3,80	3,96	2,49
nov-15	2,40	2,42	2,24	2,01	3,90	4,01	1,07	0,38	3,30	2,97	1,99	1,29	4,40	4,11	3,93	4,06
dic-15	2,70	2,39	2,44	2,14	5,10	3,99	4,17	0,98	3,90	3,18	2,57	1,77	-0,10	4,53	4,37	4,08
ene-16	-0,30	2,58	2,46	2,49	4,60	5,09	4,15	4,19	3,40	3,62	2,84	1,86	0,31	4,66	4,55	1,86
feb-16	-0,60	-0,34	2,49	2,51	3,90	3,98	4,70	3,96	2,80	3,07	3,36	2,58	-1,09	0,20	4,77	2,58
mar-16	-0,50	-0,39	-0,22	2,43	3,70	3,49	3,64	4,31	2,70	2,52	2,72	3,04	-0,97	-1,02	-0,66	3,04
CDE	$R^2$	0,4407	0,0720	0,0004	$R^2$	0,7889	0,6082	0,2616	$R^2$	0,7284	0,4655	0,4242	$R^2$	0,4918	0,1341	0,0028
	d	0,8197	0,5792	0,3880	d	0,9185	0,8461	0,6912	d	0,8983	0,7552	0,6814	d	0,8427	0,6534	0,4730
	MAE	0,5387	0,9940	1,3312	MAE	0,7730	1,0793	1,5155	MAE	0,6781	1,0562	1,3756	MAE	0,8289	1,5113	2,0687
	RMSE	0,9596	1,4007	1,6694	RMSE	1,0745	1,4815	2,0714	RMSE	0,9523	1,4853	1,7610	RMSE	1,4364	2,1503	2,6895
	%RMSE	94,0813	137,3274	163,6648	%RMSE	53,3711	73,5838	102,8817	%RMSE	41,1650	64,2057	76,1218	%RMSE	126,0042	188,6193	235,9215

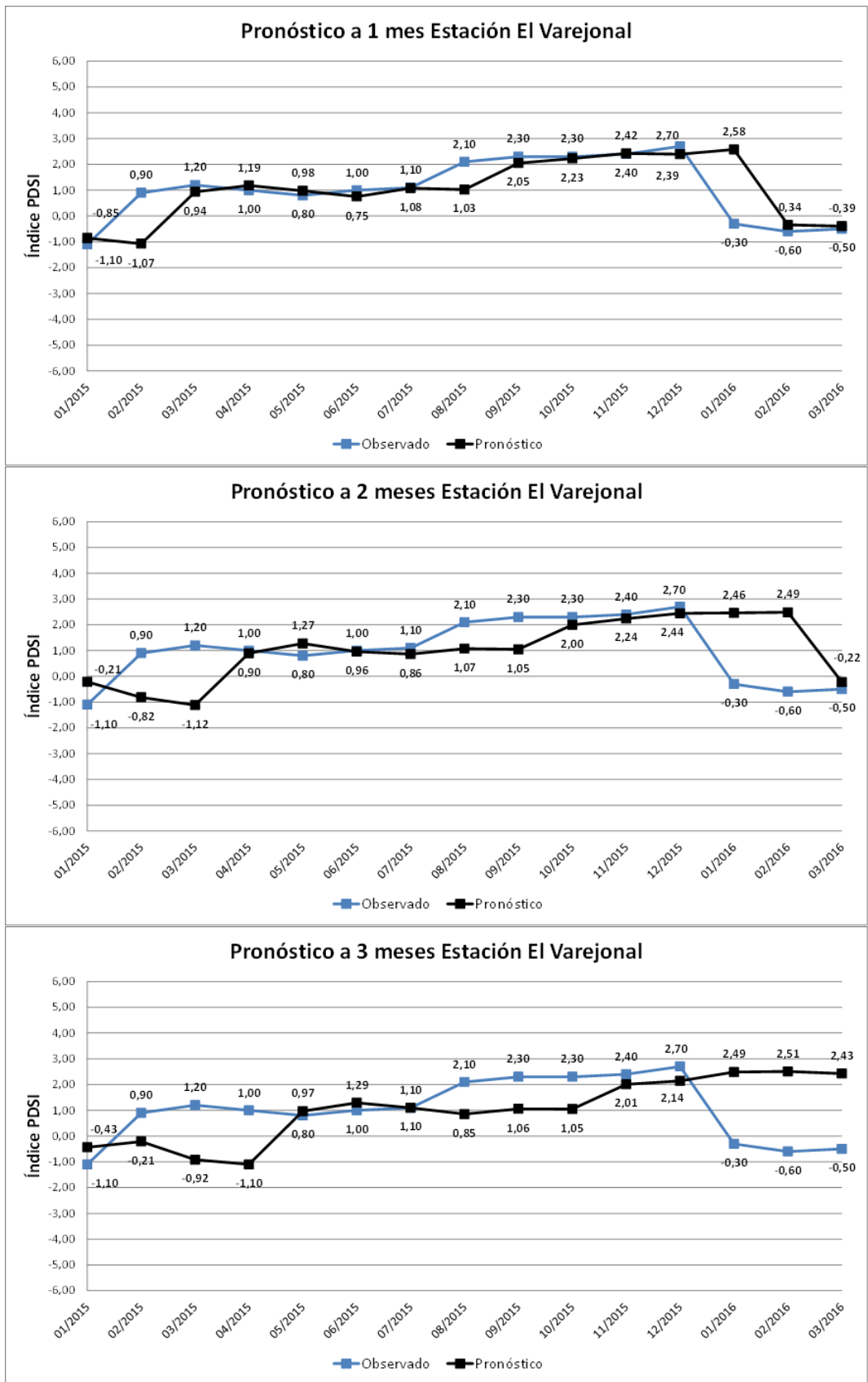


Figura 3.37. Pronóstico de PDSI a 1, 2 y 3 meses en la estación El Varejonal para el año 2015.

### **Pronóstico espacial a 1, 2 y 3 meses**

Los pronósticos de las condiciones hídricas para todo el OCPN se llevaron a cabo mediante la estimación puntual de los índices de sequía SPI y PDSI mediante el SOS en 49 estaciones climatológicas, la aplicación de las redes neuronales para el pronóstico de los índices a 1, 2 y 3 meses para cada una de estas estaciones y el uso del sistema de información geográfica ArcMap del ArcGis para el mapeo de los índices estimados y pronosticados para una mejor comparación visual entre ambos.

Los resultados del pronóstico espacial de los índices SPI y PDSI a 1, 2 y 3 meses mediante las redes neuronales para el año 2015 indican en lo general una adecuada similitud por zonas del OCPN con subvaluación del pronóstico con respecto a la realidad, para este año que fue muy húmedo por la influencia de factores climáticos entre ellos El Niño (NOAA, 2017; SMN, 2016; Landa *et al.*, 2008).

Al igual que el pronóstico temporal, a partir de un mes en particular se realiza el pronóstico espacial para los siguientes tres meses. A partir del mes de febrero se pronostica la ocurrencia o no de sequías para el período de estiaje que se presenta en los meses de marzo, abril y mayo; en mayo se pronostica para la temporada de lluvias de verano en junio, julio y agosto; y en agosto se pronostica para los meses de septiembre, octubre y noviembre.

## Índice SPI

Los resultados (Tablas 3.10 y 3.12) muestran que en lo general el pronóstico temporal de los índices de sequía SPI3 de las 49 estaciones del OCPN a uno, dos y tres meses son inferiores a los proporcionados por el PDSI, coincidiendo por lo aseverado por (Ravelo *et al.*, 2012); por tal motivo, el análisis y discusión de resultados del pronóstico espacial de sequías meteorológicas se centra en los proporcionados por el índice PDSI, mostrados en la sección siguiente.

## Índice PDSI

En la Figura 3.38 se ilustra el pronóstico espacial de la sequía meteorológica mediante el índice PDSI y el comportamiento real de las condiciones hídricas en el OCPN para los meses de estiaje marzo, abril y mayo de 2015. Los pronósticos se elaboraron en el mes de febrero y se validaron en los meses de marzo, abril y mayo.

Para el mes de marzo se pronosticó de acuerdo con el índice PDSI del mes de febrero del 2015 que habría pequeñas zonas con sequía incipiente en las localidades de Ahome, Tubares, El Dorado y La Estancia, presentándose fase de sequía incipiente (índice PDSI-03) en El Dorado y La Estancia, en Ahome se tuvo normalidad hídrica y en Tubares humedad incipiente; en cambio Huites que se pronosticó en fase de normalidad hídrica se cumplió con el pronóstico; zonas como el norte de Sinaloa en la cuenca del río Fuerte y en la Sierra Madre Occidental se pronosticaron condiciones de humedad en diferentes fases y estas fueron superadas por la realidad quedando en una fase de humedad superior a la esperada; lo mismo ocurrió en la zona del río San Pedro en el estado de Durango a excepción de la localidad de Francisco Villa en donde fueron coincidentes. En la parte sur del OCPN las condiciones hídricas entre lo pronosticado y lo real fueron similares, principalmente en la zona de las localidades de Rosamorada y Ruíz.

En el mes de abril fue más notable la diferencia entre el pronóstico del PDSI y lo estimado, marcando sequías incipiente Ahome, Tubares, El Dorado y La Estancia,

presentándose sequía incipiente en El Dorado, El Fuerte y La Estancia, en esta última se presentó sequía moderada; en la mayor parte del área restante se fue coincidente con lo pronosticado y en la demás área se presentaron condiciones de humedad superiores a las pronosticadas en sus diferentes fases, principalmente en la Sierra Madre Occidental, en las cuenca de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán, y en el parte de la Sierra de Durango en la cuenca del río San Pedro.

En el mes de mayo el comportamiento entre el pronosticado y lo ocurrido fue similar a lo ocurrido en abril, ahora siendo más coincidentes en las partes medias y bajas de las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa, Mocorito, Culiacán, San Lorenzo, Elota, Piaxtla, Quélite, Presidio y Baluarte.

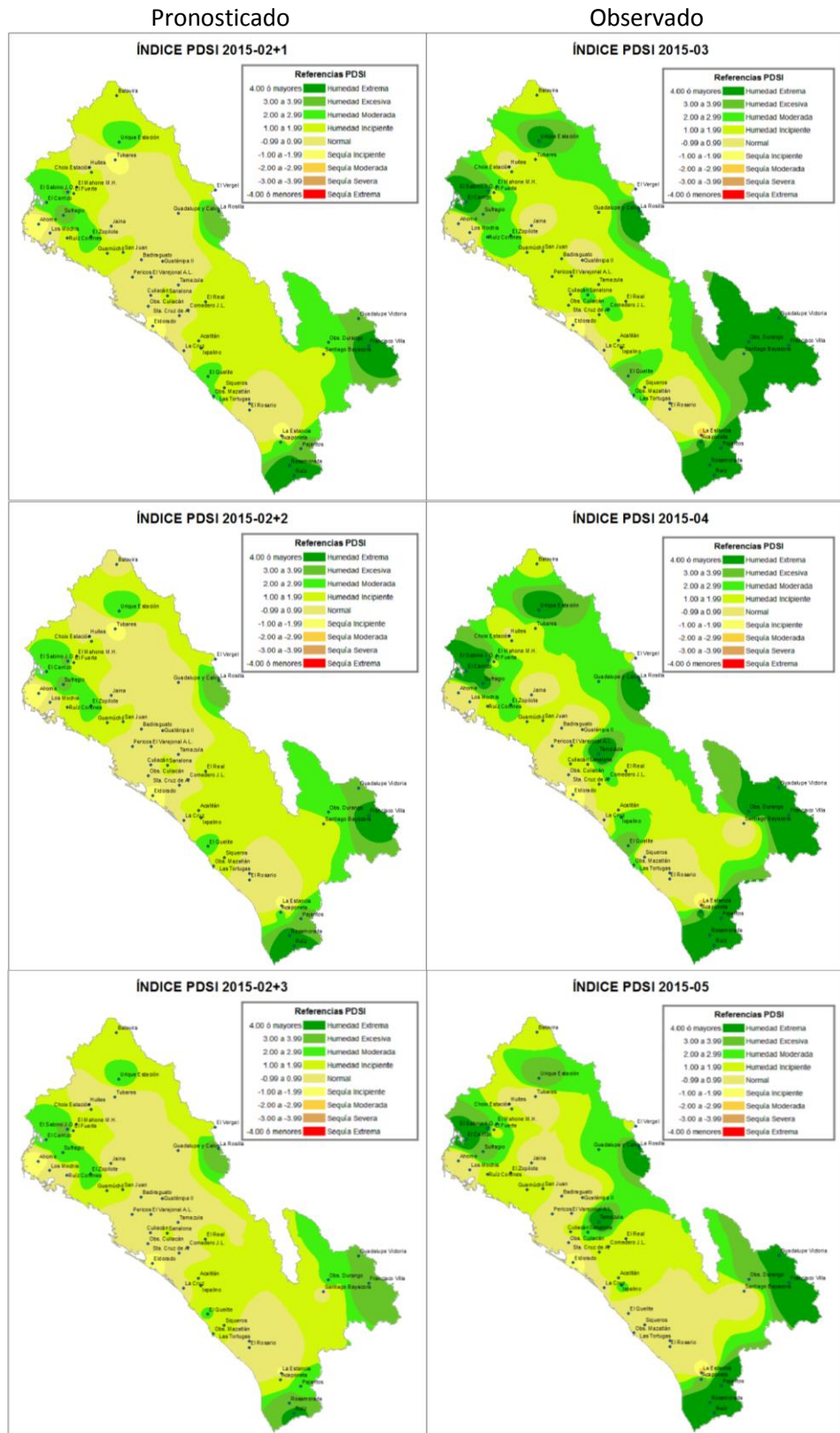


Figura 3.38. Mapas del PDSI pronosticado en febrero con 1, 2 y 3 meses de anticipo vs. PDSI observados para los meses marzo, abril y mayo de 2015 en la estación El Varejonal para el año 2015.

En la Figura 3.39 se ilustra el pronóstico espacial de la sequía meteorológica mediante el índice PDSI y el comportamiento real de las condiciones hídricas en el OCPN para los meses de lluvias de verano junio, julio y agosto de 2015. Los pronósticos se elaboraron en el mes de mayo y se validaron en los meses de junio, julio y agosto.

Para el mes de junio que es cuando inicia el período de las lluvias de verano (índice PDSI 2015-05+1), se pronosticó que habría pequeñas zonas con sequía incipiente en las localidades de El Fuerte, El Dorado y La Estancia, presentándose sequía incipiente (índice PDSI-06) en el Dorado y La Estancia, en El Fuerte se tuvo humedad moderada; en cambio en zonas donde se pronosticó normalidad hídrica se cumplió con el pronóstico en la mayor parte de ellas, solamente superadas en fase de humedad incipiente en ciertas áreas de dicha zona; en el norte de Sinaloa en la cuenca del río Fuerte y en la Sierra Madre Occidental se pronosticaron condiciones de humedad en diferentes fases y estas fueron superadas por la realidad en una fase de humedad superior a la esperada; lo mismo ocurrió en la zona del río San Pedro en el estado de Durango a excepción de las localidades de Francisco Villa y Guadalupe Victoria en donde fueron coincidentes. En la parte sur del OCPN las condiciones hídricas entre lo pronosticado y lo real fueron similares. En el mes de julio fue más notable la diferencia entre el pronóstico del PDSI y lo estimado, marcando sequías incipiente en las localidades de El Fuerte, El Dorado, Santiago Bayacora, La Estancia y Acajoneta, presentándose fases de sequía incipiente en El Fuerte en donde se coincidió; moderada en El Dorado, La Estancia y Acajoneta, presentándose además una zona de sequía incipiente en el área de las localidades Siqueros, Observatorio Mazatlán, Las Tortugas y El Rosario; en la mayor parte de la zona de fase de normalidad hídrica fue coincidente con lo pronosticado; no así, en zonas de fases de humedad donde se presentaron fases superiores que las pronosticadas a excepción del área de las localidades de Pajaritos, Rosamorada y Ruíz en la zona sur del OCPN. En el mes de agosto que es el más lluvioso del año, el comportamiento entre el pronosticado y lo ocurrido fue diferentes en mayor parte de las áreas con diferentes fases de sequía, siendo similar solamente en áreas de normalidad hídrica; en las zonas en donde se pronosticaron sequías incipientes se presentaron fases de sequía incipiente a severa. En zonas en donde se pronosticaron fases



de humedad, éstas fueron superadas en la mayor parte, existiendo zonas en donde se pronosticaron fases de humedad y se presentó normalidad hídrica.

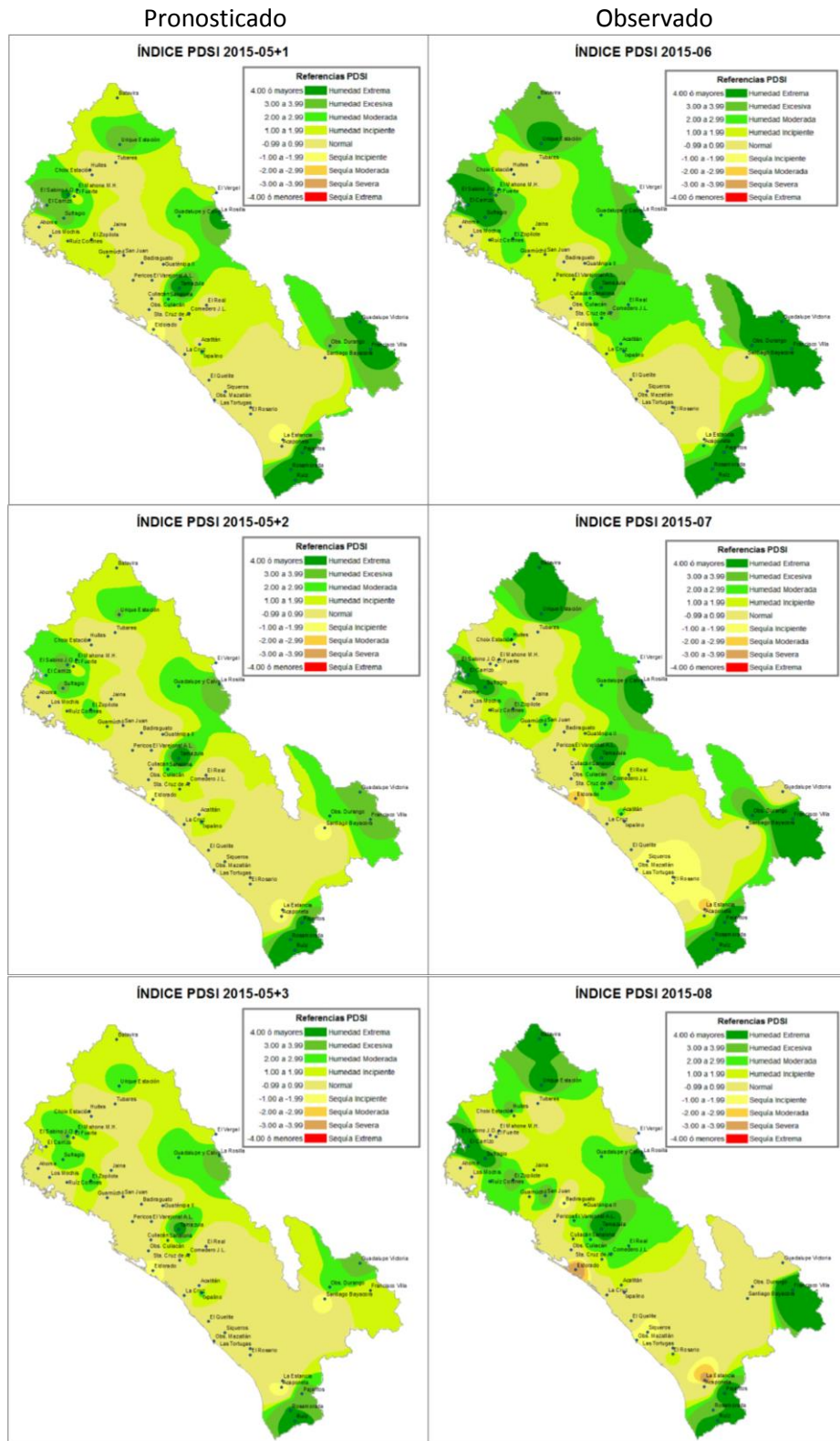


Figura 3.39: Mapas del PDSI pronosticado vs. PDSI estimado para los meses junio, julio y agosto de 2015 en la estación El Varejonal para el año 2015.

En la Figura 3.40 se ilustra el pronóstico espacial de la sequía meteorológica mediante el índice PDSI y el comportamiento real de las condiciones hídricas en el OCPN para los meses de lluvias de verano y otoño en septiembre, octubre y noviembre de 2015. Los pronósticos se elaboraron en el mes de agosto y se validaron en los meses de septiembre, octubre y noviembre.

Para el mes de septiembre se pronosticó (índice PDSI 2015-08+1) que la mayor parte del OCPN tendría condiciones de normalidad hídrica, con pequeñas zonas en fases de sequía de incipiente a moderada en las localidades de El Real, Comedero, El Dorado y La Estancia, en Sinaloa y Guadalupe Victoria en el estado de Durango; así como, condiciones de humedad de incipiente a extrema en algunas zonas específicas como los alrededores de Batovira en la Sierra Madre Occidental, en la cuenca alta del río Fuerte, en Huites en la parte media y el Carrizo en la parte baja de la cuenca de dicho río; la localidad de Tamazula en la cuenca alta del río Culiacán, Francisco Villa en la parte alta del río San Pedro, en el estado de Durango; así como las localidades de Pajaritos, Rosamorada y Ruíz en la parte baja del río San Pedro, en el estado de Nayarit. En la realidad (índice PDSI-09) las manifestaciones de humedad fueron mayores a las pronosticadas; principalmente en la zona alta de la Sierra Madre Occidental dentro de la cuenca del río Fuerte, donde la humedad llegó a su fase extrema, lo mismo ocurrió en las zonas altas del río San Pedro, en las zonas intermedias y altas de los ríos Sinaloa, Mocorito, Culiacán, Humaya, Tamazula y San Lorenzo, y en la parte sur del OCPN en las localidades de Rosamorada, Ruíz y Pajaritos. Las zonas con fases de sequía disminuyeron en intensidad y extensión a excepción de las sequías incipientes en la zona de las localidades Santiago Bayacora y Durango.

En el mes de octubre fue más notable la diferencia entre el pronóstico del PDSI y lo estimado, siendo subestimado el año húmedo por el pronóstico. Este mes solo marco la existencia de sequía meteorológica en fases de incipiente, moderada y severa en las localidades de El Fuerte, Tubares, El Dorado, Ixpalino y El Rosario. Finalmente, en el mes de noviembre fue más marcada la brecha entre las zonas de sequías pronosticadas y lo que ocurrió en la realidad, el pronóstico indicaba que la mayor parte del OCPN sería de normalidad hídrica y resulto que la mayor parte del OCPN estuvo en condiciones de humedad, en sus diferentes fases.

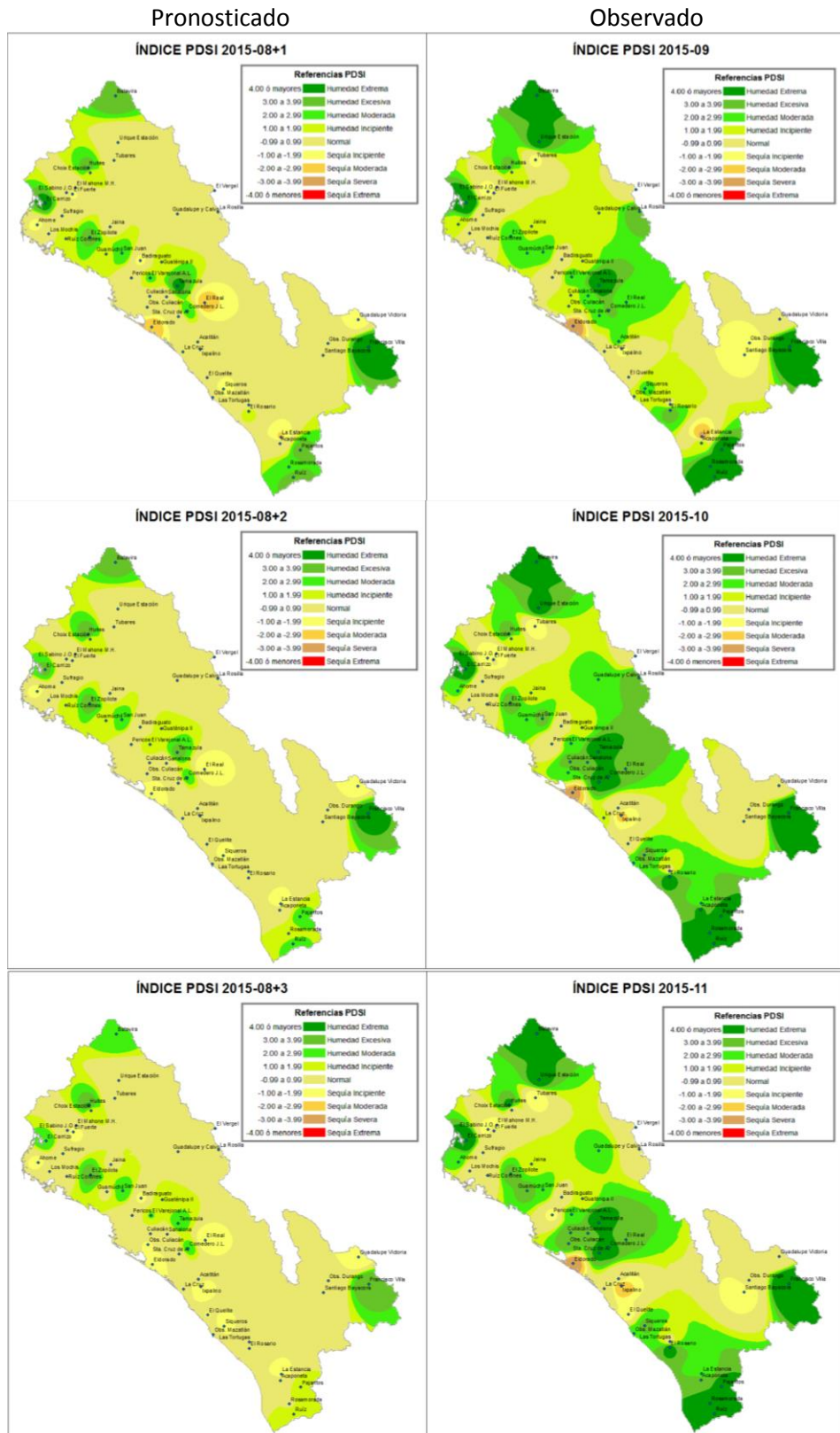


Figura 3.40: Mapas del PDSI pronosticado vs. PDSI estimado para los meses septiembre, octubre y noviembre de 2015 en la estación El Varejonal para el año 2015.

## **PRONÓSTICO TEMPORAL DE SEQUÍAS HIDROLÓGICAS**

En esta sección se describe los resultados del pronóstico temporal de las sequías hidrológicas, mediante la aplicación de redes neuronales y las variables climatológicas (precipitación, temperatura media, máxima y mínima, evaporación) y de escurrimiento (Q) e índices de escurrimiento (SDI) y de Estado de las presas (Ie), en las principales corrientes y presas del Organismo de Cuencas del Pacífico Norte (OCPN).

### **Pronóstico temporal a 1, 2 y 3 meses**

El pronóstico de las sequías hidrológicas fue realizado con redes neuronales (Kim *et al.*, 2002, Ravelo, 2008, Ravelo *et al.*, 2014), conforme al procedimiento descrito en el punto 2.2.3 del capítulo anterior, teniendo como datos de entrada las variables climatológicas e hidrológicas por cuenca e índice de sequía de escurrimiento estandarizado (SDI) históricos y los resultados fueron analizados estadísticamente mediante el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), coeficiente de concordancia de Willmott (d), Error Absoluto Medio (MAE), Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Porcentaje del Error Cuadrático Medio (% de RMSE) (Dawson, 2001). Los resultados puntuales del pronóstico fueron obtenidos por localidad, correspondiente a un punto de interés, ya sea una estación hidrométrica en corrientes importantes o un punto de ingreso al vaso de una presa.

### **Escurrecimientos mensuales (Q)**

El análisis multivariado del comportamiento histórico de los escurrimientos mensuales de los ingresos a los embalses se realizó considerando su variabilidad temporal, así como las variables de precipitación, evaporación potencial y temperaturas medias, máximas y mínimas registradas en las estaciones meteorológicas con influencia en la cuenca de aportación al vaso de las presas. El período considerado para el análisis dependió de su nivel de información; por ejemplo: para la cuenca del río Humaya que aporta volúmenes de escurrimiento al vaso de la presa El Varejonal, los datos utilizados fueron los volúmenes de escurrimientos mensuales (Q) registrados al ingreso al vaso de la presa y los datos

climatológicos (precipitación, temperaturas y evaporación potencial) de las estaciones Vascogil, La Huerta, Badiraguato y Guatenipa, para el período 1978-2015 (CONAGUA, 2016).

Para cada caso en particular, se realizaron combinaciones de las variables y llevaron a cabo análisis de componentes principales mediante programa InfoStat, determinando el grado de influencia de dichas variables en la determinación del volumen de ingreso mensual a los embalses; así como su grado de dispersión y el ajuste de las curvas a los datos.

En la Figura 3.41 se muestra la dispersión de volúmenes de ingreso de agua mensuales al vaso de la presa el Varejonal estimados respecto a los observados, para el período 1978-2015; los volúmenes estimados fueron los valores pronosticados mediante las redes neuronales y los observados son los registrados en la estación hidrométrica al ingreso al vaso de la presa. Los puntos se agrupan alrededor de una línea recta aproximadamente de 45°.

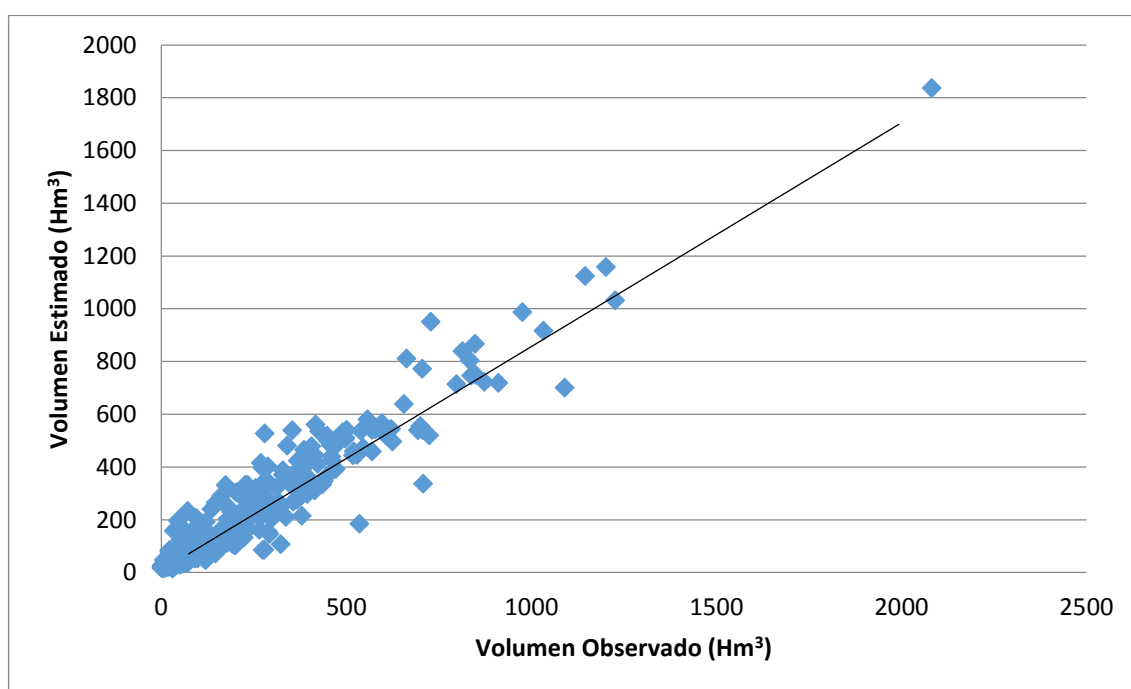


Figura 3.41: Diagrama de dispersión de los volúmenes de ingreso mensual estimados vs. observados en la presa El Varejonal, período 1978-2015.

El pronóstico de los volúmenes de escurrimiento de ingreso mensuales a las presas, se estimó mediante la aplicación de diferentes modelos (Multilayer Perceptron, Generalized Feed Forward, Modular Neural Network, Jordán/Elman Network y Principal Component Analysis) y estructuras de Redes Neuronales, considerando diferentes funciones de transferencia (TanhAxon, SigmoidAxon, Linear T TanhAxon) y Learning Rule (Step, Momentum, Conjugate Gradiente), considerando diferentes porcentajes de datos para su entrenamiento y validación. El modelo que proporcionó los mejores resultados fue la Multilayer Perceptron de dos capas, al obtener el mejor ajuste y menor error, Tabla 3.13.

Tabla 3.13: Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), coeficiente de concordancia de Willmott (d) y errores absoluto medio (MAE), cuadrático medio (MRSE), y porcentaje del cuadrático medio (%MRSE) entre valores calculados y pronosticados de los volúmenes mensuales de ingreso a la presa Sanalona para el año 2015 (n=12).

<b>Coeficientes de determinación y errores (CDE) de los diferentes modelos de redes neuronales utilizados para Pronósticos Hidrológicos en La Cuenca del Río Tamazula</b>				
<b>CDE</b>	<b>Multilayer Perceptron (1 Layer)</b>	<b>Multilayer Perceptron (2 Layer)</b>	<b>Modular Neural Network</b>	<b>Generalized Feed Forward</b>
$R^2$	0,542171907	0,928662884	0,768426477	0,900118239
d	0,674225011	0,973575416	0,901128437	0,925129004
MAE	50,66053842	20,89384833	35,19934267	49,15773783
RMSE	86,91458247	31,29715596	54,63757679	52,70163672
%RMSE	102,5611389	36,93133958	64,47355486	62,18910256

En la Tabla 3.13 se observa que el Coeficiente de Determinación más alto y cercano a 1 ( $R^2 = 0,928$ ) y los menores errores estimados por diferentes criterios (d= 0,973, MAE= 20,893, RMSE= 31,297 y %RMSE= 36,931) fueron los proporcionados por los pronósticos de los volúmenes de ingreso mensuales (Q) a la presa Sanalona, mediante el modelo Multilayer Perceptron de dos capas.

En la Figura 3.42, se comparan los volúmenes de escurrimiento de ingreso mensual Q ( $\text{hm}^3$ ) a la presa El Varejonal Vs los volúmenes de ingreso mensual estimados mediante el

modelo de Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas, en la etapa de entrenamiento y calibración del modelo, considerando los datos registrados en el período 1978-2014.

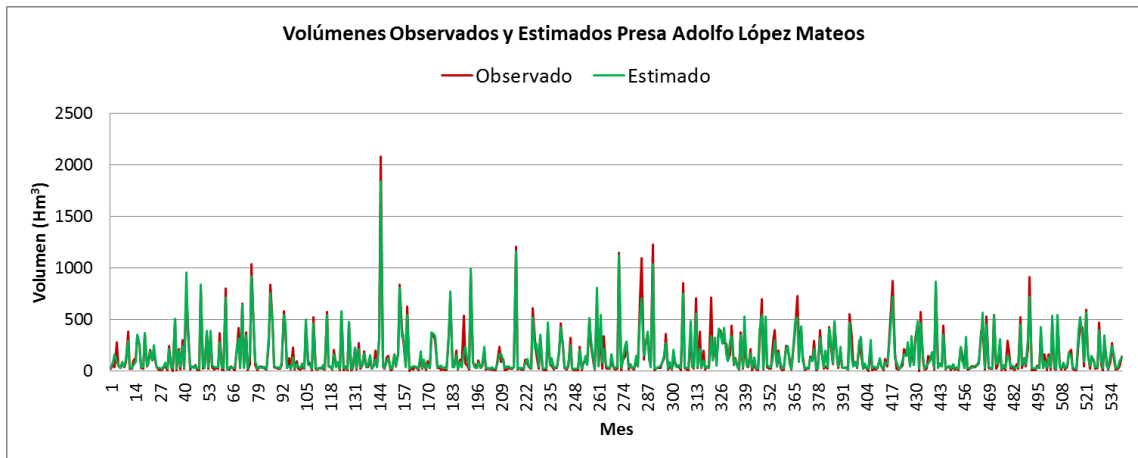


Figura 3.42: Volúmenes de ingreso mensuales Q (hm<sup>3</sup>) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa El Varejonal, período 1978-2015.

La gráficas de dispersión (3.42) y de variación mensual (3.43) de los escurrimientos del río Humaya que ingresan a la presa El Varejonal, muestran una buena correlación entre lo observado y lo pronosticado mediante redes neuronales Multilayer Perceptron de 2 capas, para valores inferiores a los 600 hm<sup>3</sup>/mes, los cuales son los más frecuentes ya que el promedio es menor a los 200 hm<sup>3</sup>/mes, dentro del período de análisis 1978-2014 los mejores ajustes se dieron con los valores de escurrimiento más bajos, lo cual indica una correlación adecuada para los valores de estiaje o período con sequía.

Para el pronóstico de los volúmenes de escurrimiento mensuales Q (hm<sup>3</sup>/mes) mediante las redes neuronales se tomaron como base las series históricas de las variables climatológicas que influyen en la cuenca y de escurrimiento a la salida de la misma en un punto de interés, para el entrenamiento y prueba se utilizaron los datos históricos y para la validación de la producción se utilizaron los datos correspondientes al año de producción; así por ejemplo, para el Sistema Hídrico del río Culiacán se analizaron las cuencas de los ríos Humaya y Tamazula, con punto de salida en las estaciones hidrométricas al punto de ingreso de los vasos de las presas El Varejonal y Sanalona, respectivamente. En ambos casos, se llevaron a cabo el entrenamiento con datos históricos desde el inicio al año 2010, para generar producción y validación del año 2011 que fue año seco; de manera similar se

entrenaron con datos históricos al año 2011 para generar producción y validación al año 2012 y así sucesivamente hasta lograr la producción al año 2015.

En las Tablas 3.14 y 3.15 se muestran los valores de la producción para los años 2011, 2012, 2013, 2014 y 2015, con sus respectivos valores de correlación y criterios de estimación de errores, correspondientes al Sistemas de las presas del río Culiacán: Adolfo López Mateos (El Varejonal) y Sanalona, respectivamente. De acuerdo con el análisis realizado en el monitoreo de sequías en las secciones antecedentes, en los años 2011 y 2012 se presentaron sequías meteorológicas e hidrológicas de incipientes a extremas en algunos meses, 2013 fue un año seco hasta septiembre de 2013 cuando se presentó el huracán Manuel (CONAGUA, 2014) y termino con la sequía hidrológica al recuperar los niveles de almacenamiento en las presas, en Sanalona llego a derramar (OCPN, 2013); 2014 fue un año normal y 2015 un año húmedo, debido al desarrollo del Monzón Mexicano (SMN, 2016) por efectos del fenómeno de Niño (IRIS, 2016; NOAA,2016).

En Tabla 3.14 se observa que la correlación entre los valores de escurrimiento mensual producto de la producción mediante redes neuronales y los volúmenes de escurrimiento registrados en el ingreso al vaso de la presa Adolfo López Mateos (El Varejonal) es muy alta con valores de  $R^2$  superiores a 0,92, para año seco 2011 ( $R^2 = 0,996$ ), año con sequía hidrológica de moderada a extrema 2012 ( $R^2 = 0,933$ ), año con sequía en más de 65% de los meses y la presencia del huracán Manuel ( $R^2 = 0,968$ ), año normal 2014 ( $R^2 = 0,983$ ) y año húmedo 2015 ( $R^2 = 0,929$ ). Las mejores correlaciones fueron con años con sequía meteorológica extrema e hidrológica de incipiente a moderada (2011, 2013), seguido de año normal (2014), y los menos buenos los años con eventos extremos, con sequía hidrológica extrema (2012) y con humedad extrema (2015). Los otros métodos de estimación de errores (d, MAE, RMSE y %RMSE) indican muy buena aproximación entre los volúmenes de escurrimiento mensuales estimados mediante el modelo de red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas y sus correspondientes valores de volúmenes registrados.



Tabla 3.14: Valores de producción de escurrimiento Q (hm<sup>3</sup>/mes) mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa El Varejonal para el período 2011-2015 y sus respectivos criterios de correlación y de estimación de errores (R<sup>2</sup>, d, MAE, MRSE y %MRSE) entre valores calculados y pronosticados (n=12, para cada año).

<b>Volumen de Escurrimiento Presa Adolfo López Mateos</b>										
<b>Fecha</b>	<b>Año 2011</b>		<b>Año 2012</b>		<b>Año 2013</b>		<b>Año 2014</b>		<b>Año 2015</b>	
	Observado	Estimado	Observado	Estimado	Observado	Estimado	Observado	Estimado	Observado	Estimado
Enero	8,49	23,42	6,79	24,68	28,44	39,56	24,84	34,99	6,92	25,23
Febrero	10,35	17,35	6,51	33,03	2,84	22,56	11,08	24,73	84,79	86,29
Marzo	2,68	18,66	4,02	21,71	2,94	18,06	4,28	20,43	44,99	61,42
Abril	5,57	25,31	1,30	17,65	1,36	17,27	2,09	17,45	16,31	17,13
Mayo	16,75	26,62	6,64	20,67	0,77	16,37	2,86	18,95	4,65	9,90
Junio	12,32	26,95	12,23	35,57	7,82	25,78	31,93	58,11	43,11	41,0
Julio	246,29	296,38	282,83	350,58	106,01	152,77	266,96	348,24	491,01	451,65
Agosto	178,41	152,04	376,45	342,07	274,52	84,42	462,18	358,43	366,11	574,59
Septiembre	70,07	35,52	236,66	200,73	1.032,89	915,90	527,07	541,60	324,34	390,35
Octubre	12,21	19,21	61,61	47,33	67,71	80,83	110,26	52,05	230,59	125,73
Noviembre	14,61	27,22	13,14	32,27	92,81	135,26	38,45	39,82	29,57	48,22
Diciembre	11,57	43,92	21,02	42,33	20,66	36,48	20,74	26,64	42,67	39,30
<b>CDE</b>	R <sup>2</sup>	0,996	R <sup>2</sup>	0,933	R <sup>2</sup>	0,968	R <sup>2</sup>	0,983	R <sup>2</sup>	0,929
	d	0,974	d	0,981	d	0,990	d	0,990	d	0,974
	MAE	8,895	MAE	11,942	MAE	14,852	MAE	9,394	MAE	20,894
	RMSE	16,592	RMSE	20,270	RMSE	25,941	RMSE	14,311	RMSE	31,297
	%RMSE	63,833	%RMSE	46,311	%RMSE	40,399	%RMSE	29,537	%RMSE	36,931

El comportamiento del pronóstico arrojado por la producción mediante el modelo de red Multilayer Perceptron de dos capas a los volúmenes de escurrimiento mensuales de ingreso a la presa Adolfo López Mateos (El Varejonal) se discuten por año: período 2011-2012, año con sequías meteorológicas e hidrológicas en fases de incipiente a extrema (Figuras 3.43 y 3.44); 2013, año con sequía los primeros 8 meses y terminando con la presencia del huracán Manuel en el mes de septiembre (Figura 3.45); 2014, año con normalidad hídrica las mayor parte del tiempo con sequías y humedades incipientes a moderadas focalizadas en algunas áreas del OCPN en algunos meses (Figura 3.46) y 2015, año húmedo con desarrollo del Monzón Mexicano por influencia del fenómeno de El Niño (Figura 3.47).

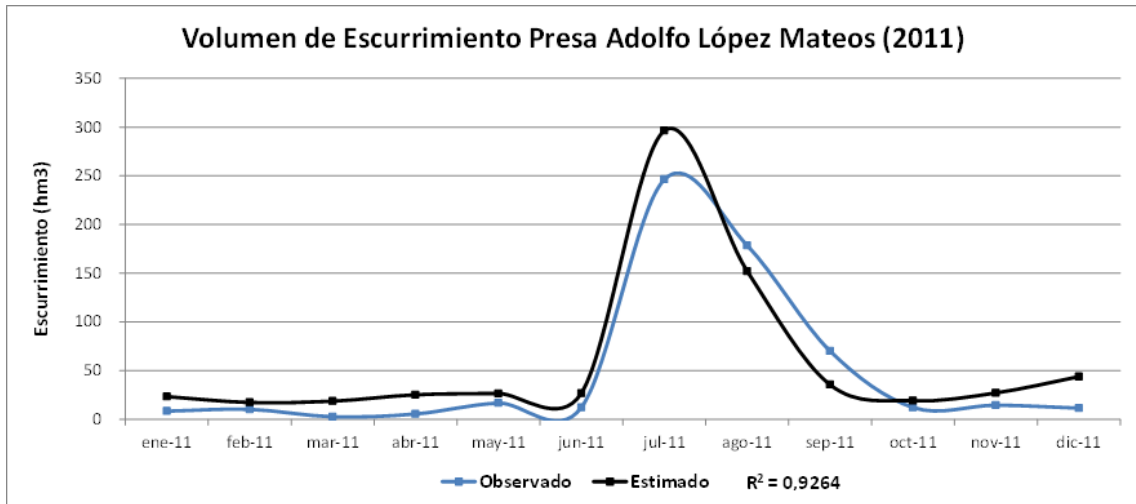


Figura 3.43: Volúmenes de ingreso mensuales Q (hm<sup>3</sup>) observados vs. estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa El Varejonal, año 2011.

Los valores de escurrimiento mensuales observados (registrados) en el año 2011 (Figura 3.43) muestran un comportamiento atípico al de las normales de escurrimiento de la estación Varejonal pero con valores menores debido a la sequía; de enero a junio los valores son muy pequeños con escurrimiento prácticamente cero, a excepción del mes de mayo que tuvo un pequeño repunte, todos los valores fueron menores a los 20 hm<sup>3</sup>; en el mes de julio se presentaron los escurrimientos más importantes de este año pero menores a los 250 hm<sup>3</sup> ligeramente inferior a la normal de escurrimiento de ese mes, en el mes de agosto los volúmenes de escurrimiento descendieron por debajo de los 200 hm<sup>3</sup> y en el mes de septiembre por debajo de los 100 hm<sup>3</sup> cuando la normal de escurrimiento de esos meses es por encima de los 400 hm<sup>3</sup> (Figura 3.24); en octubre los volúmenes de escurrimiento disminuyeron por debajo de los 50 hm<sup>3</sup>, cuando la normal de escurrimiento es cercano a los 200 hm<sup>3</sup>; en los meses de noviembre y diciembre los escurrimientos estuvieron por debajo de los 20 hm<sup>3</sup>, cuando las normales de escurrimiento para esos meses están por encima de los 100 hm<sup>3</sup>. Los valores estimados (producidos) mediante las redes neuronales fueron muy similares a los observados, conservando su forma y con valores muy aproximados; de enero a julio los valores estimados fueron ligeramente superiores a los observados que fueron muy bajos debido a la sequía; en agosto y septiembre los valores estimados fueron muy similares pero ligeramente menores a los observados; en el mes de octubre fueron prácticamente iguales; para los meses de noviembre y diciembre el valor

estimado siguió la tendencia de las normales climatológicas y estuvieron ligeramente superiores a los observados que debido a la sequía fueron prácticamente nulos.

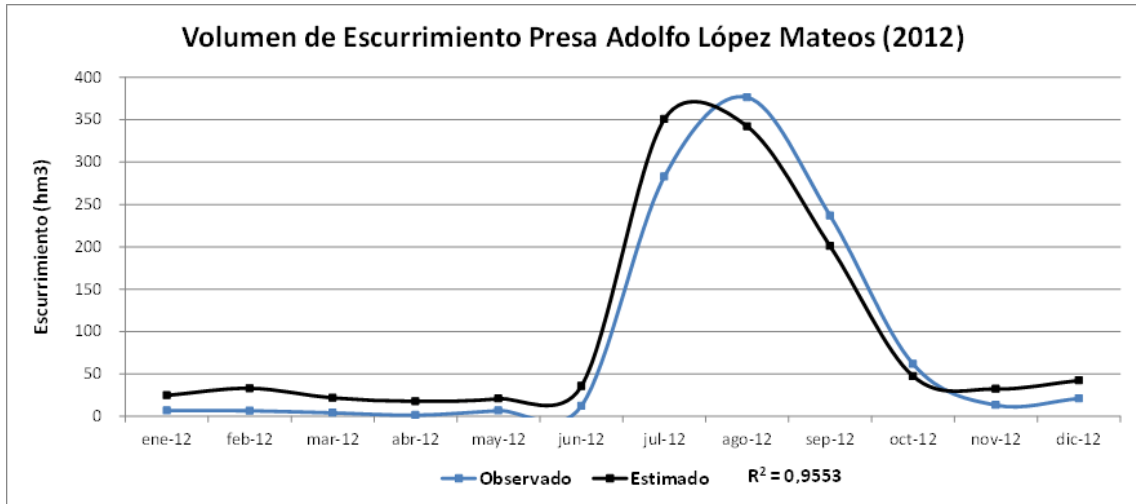


Figura 3.44: Volúmenes de ingreso mensuales Q (hm<sup>3</sup>) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa El Varejonal, año 2012.

En el año 2012, los valores de escurrimiento mensuales observados (Figura 3.44) muestran un comportamiento típico al de las normales de escurrimiento de la estación Varejonal (Figura 3.24) pero con valores menores debido a la sequía; en los meses de enero a junio los escurrimientos fueron prácticamente nulos debido a la presencia de sequías meteorológicas extremas, generando sequías hidrológicas de moderada a extremas, en junio los niveles de las presas llegaron a su mínima expresión histórica; en cambio, en julio se presentaron escurrimientos cercanos a la normal de escurrimiento de este mes; en estos meses los valores estimados mediante las redes neuronales fueron ligeramente superiores a las observadas. Durante los meses de agosto, septiembre y octubre los valores estimados fueron ligeramente inferiores a los observados, siendo el diferencial más grande para el mes de agosto que es el más lluvioso y de mayores escurrimientos del año, el volumen escurrido en este mes fue ligeramente inferior al correspondiente al de su normal de escurrimiento, en cambio en septiembre los escurrimientos fueron muy inferiores a de su normal de escurrimientos; en octubre los valores entre lo observado y estimado fueron muy similares y muy por debajo de su normal de escurrimiento. En los meses de noviembre y diciembre los valores estimados fueron superiores a los observados siguiendo la tendencia de sus normales de escurrimiento, pero con valores menores a los 50 hm<sup>3</sup> que

son muy inferiores a sus correspondientes de sus normales de escurrimiento que son superiores a los 100 hm<sup>3</sup>, debido a la presencia de la sequía.

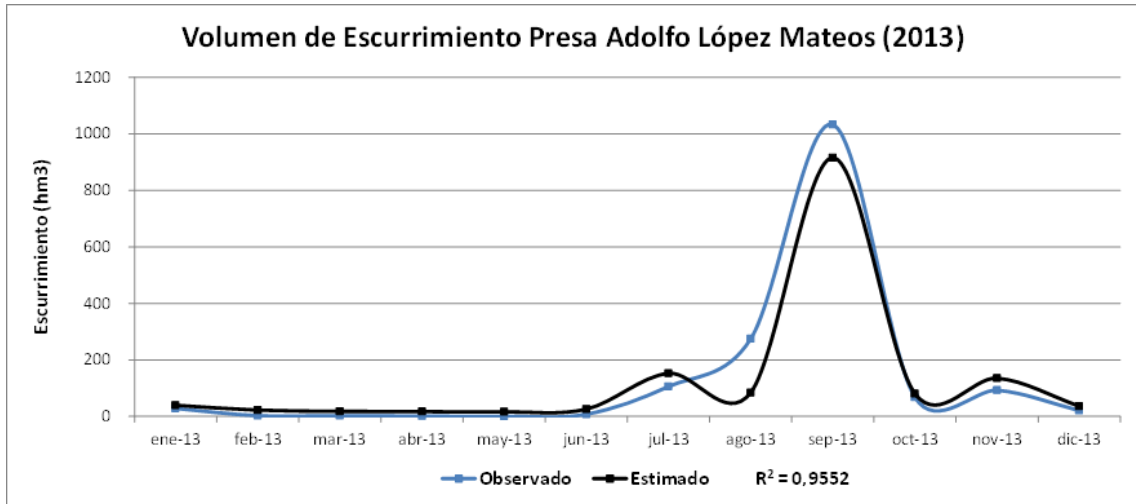


Figura 3.45: Volúmenes de ingreso mensuales Q (hm<sup>3</sup>) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa El Varejonal, año 2013.

En el año 2013, los valores de escurrimiento mensuales observados (Figura 3.45) muestran un comportamiento atípico al de las normales de escurrimiento de la estación Varejonal (Figura 3.24); en los primeros siete meses del año la sequía continua con escurrimientos prácticamente nulos hasta el mes de junio, en julio se presentan escurrimientos inferiores a su normal, los valores de escurrimiento estimados y observados fueron muy similares pero con valores menores debido a la sequía; en agosto el escurrimiento estimado fue muy inferior al observado, la cual a su vez fue inferior a su correspondiente normal de escurrimiento, debido a la continuidad de la sequía. En el mes de septiembre se tuvo la presencia del huracán Manuel que acabo con la sequía meteorológica e hidrológica provocando un escurrimiento mensual superior a los 1000 hm<sup>3</sup>, muy por encima de su normal de escurrimiento que es ligeramente superior a los 400 hm<sup>3</sup>; en octubre los valores entre lo observado y estimado fueron muy similares y muy por debajo de su normal de escurrimiento. En los meses de noviembre y diciembre los valores estimados fueron ligeramente superiores a los observados siguiendo una tendencia inversa a sus normales de escurrimiento, en noviembre el valor observado fue similar al de su normal de escurrimiento y en diciembre el valor observado bajo a un valor muy pequeño

cercano a cero cuando su normal de escurrimiento es superior a los 150 hm<sup>3</sup>, debido a la presencia de la sequía meteorológica e hidrológicas de incipientes a moderadas.

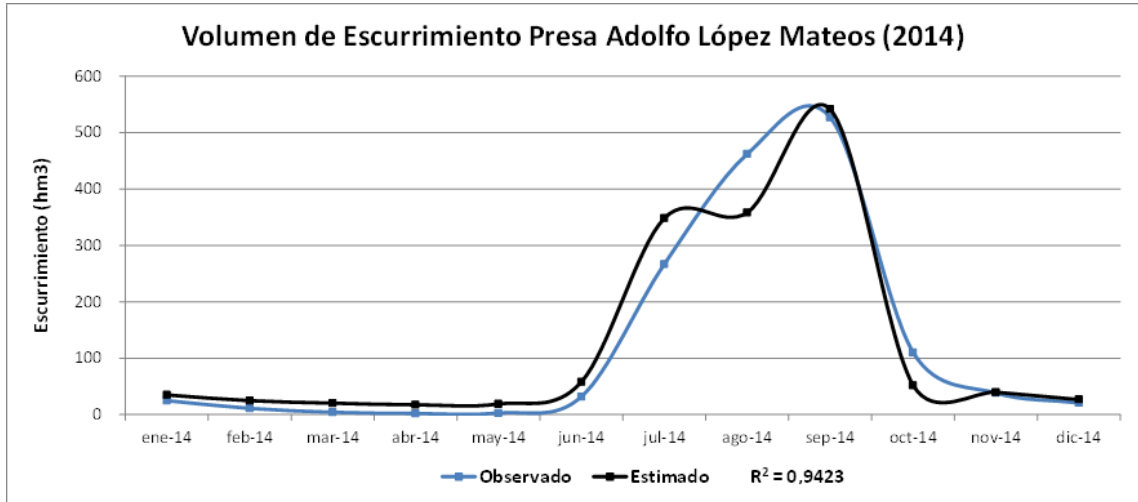


Figura 3.46: Volúmenes de ingreso mensuales Q (hm<sup>3</sup>) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa El Varejonal, año 2014.

En el año 2014, los valores de escurrimiento mensuales observados (Figura 3.46) muestran un comportamiento típico al de las normales de escurrimiento de la estación Varejonal (Figura 3.24); en los meses de enero a junio se presentaron escurrimientos por debajo de su normal de escurrimiento tendientes a cero al mes de mayo, en junio presenta escasos escurrimientos, en estos meses los valores estimados fueron muy cercanos a los valores observados; en el mes de julio el valor estimado fue superior al observado el cual presentó un escurrimiento cercano al de su normal de escurrimiento; en agosto y septiembre los escurrimientos fueron por encima de su normal, el valor estimado fue muy inferior al observado, en cambio en septiembre fueron prácticamente iguales; en el mes de octubre el valor estimado fue ligeramente inferior al observado, cuyos escurrimientos fueron muy inferiores a su normal; en noviembre y diciembre los valores estimados fueron prácticamente iguales a los observados, los cuales estuvieron por debajo de su normal.

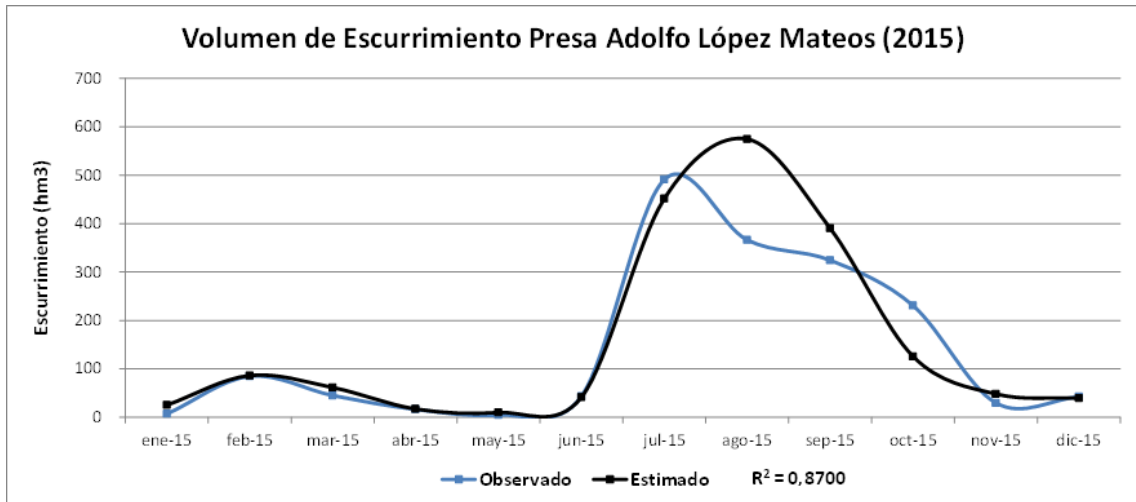


Figura 3.47: Volúmenes de ingreso mensuales Q (hm<sup>3</sup>) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa El Varejonal, año 2015.

Finalmente, en el año 2015, los valores de escurrimiento mensuales observados (Figura 3.47) muestran un comportamiento atípico al de sus normales de escurrimiento de la estación Varejonal (Figura 3.24); en el mes de enero los escurrimientos fueron por abajo de su normal y febrero estuvo por encima, de marzo a mayo los escurrimientos descendieron drásticamente a valores cercanos a cero en mayo, en junio repunto ligeramente con valores cercanos a su normal; en cambio, en el mes de julio los escurrimientos observados fueron muy superiores a su normal, el valor estimado fue ligeramente inferior al observado; en agosto el valor estimado fue muy superior al observado, mientras las redes siguieron una tendencia ascendente en la realidad los escurrimientos tendieron a su normalidad, ya que este valor observado fue ligeramente inferior a su normal, este desequilibrio en la red fue producto del valor inusual de escurrimientos en el mes de julio, en el cual las lluvias fueron muy superiores a lo normal, posiblemente por efectos del fenómeno de El Niño (SMN, 2016) que motivaron el desarrollo del Monzón Mexicano que se presenta durante la lluvias de verano (Magaña *et al.*, 2004); en septiembre los escurrimientos fueron muy por debajo de su normal, el valor estimado fue cercano a la normal y superior al valor observado; en cambio octubre presento escurrimientos por encima de su normal y la red estimó un valor muy por debajo de lo observado, esta diferencia es debido a la terminación de las lluvias de verano y el inicio de un nuevo régimen de lluvias las de transición entre las de verano e invierno. En los meses de noviembre y diciembre los valores estimados fueron muy similares a los

observados, con escurrimientos por debajo de su normal debido a la inhibición de nueva cuenta de las lluvias y escurrimientos de invierno en esta zona.

Tabla 3.15: Valores de producción de escurrimiento Q (hm<sup>3</sup>/mes) mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa Sanalona para el período 2011-2015 y sus respectivos criterios de correlación y determinación de errores (R<sup>2</sup>, MAE, MRSE, d y %MRSE) entre valores calculados y pronosticados (n=12, para cada año).

Volumen de Escurrimiento Presa Sanalona										
Fecha	Año 2011		Año 2012		Año 2013		Año 2014		Año 2015	
	Observado	Estimado	Observado	Estimado	Observado	Estimado	Observado	Estimado	Observado	Estimado
Enero	2,14	4,91	0,67	2,85	4,68	4,91	10,77	7,79	3,63	7,58
Febrero	3,40	1,88	0,48	2,18	2,35	3,84	7,11	4,61	12,15	21,64
Marzo	2,80	2,21	2,19	2,18	0,70	1,20	2,91	4,01	7,93	13,05
Abril	2,23	4,83	2,22	3,32	0,48	2,75	1,12	4,79	8,33	6,24
Mayo	1,17	7,06	2,37	6,98	0,48	6,40	0,64	7,06	1,07	7,52
Junio	4,05	11,00	1,76	11,39	0,44	7,31	17,74	18,20	33,05	25,34
Julio	141,20	190,37	147,04	192,37	55,02	37,16	107,73	146,46	331,07	249,93
Agosto	101,40	128,43	247,40	197,59	125,65	126,59	149,42	170,50	219,10	248,98
Septiembre	41,79	48,73	97,68	102,24	469,53	475,48	216,70	227,58	133,81	140,39
Octubre	2,51	5,23	14,54	24,29	25,52	100,72	45,72	61,98	202,86	149,87
Noviembre	5,51	6,07	4,44	6,78	73,45	111,53	17,14	9,50	33,40	65,06
Diciembre	3,72	3,73	4,45	16,73	12,24	35,15	4,41	5,42	30,53	44,19
CDE	R <sup>2</sup>	0,999	R <sup>2</sup>	0,933	R <sup>2</sup>	0,968	R <sup>2</sup>	0,980	R <sup>2</sup>	0,929
	d	0,974	d	0,981	d	0,990	d	0,990	d	0,974
	MAE	8,891	MAE	11,942	MAE	14,852	MAE	9,361	MAE	20,424
	RMSE	16,501	RMSE	20,270	RMSE	25,941	RMSE	14,311	RMSE	31,297
	%RMSE	63,803	%RMSE	46,313	%RMSE	40,398	%RMSE	29,530	%RMSE	36,931

En Tabla 3.15 se observa que la correlación entre los valores de escurrimiento mensual producto de la producción mediante redes neuronales y los volúmenes de escurrimiento registrados en el ingreso al vaso de la presa Sanalona es muy alta con valores de R<sup>2</sup> superiores a 0,92, para año seco 2011 (R<sup>2</sup> = 0,999), año con sequía hidrológica de moderada a extrema 2012 (R<sup>2</sup> = 0,933), año con sequía en más de 65% de los meses y la presencia del huracán Manuel (R<sup>2</sup> = 0,968), año normal 2014 (R<sup>2</sup> = 0,983) y año húmedo 2015 (R<sup>2</sup> = 0,929). Las mejores correlaciones fueron con años con sequía meteorológica

extrema e hidrológica de incipiente a moderada (2011, 2013), seguido de año normal (2014), y los menos buenos los años con eventos extremos, con sequía hidrológica extrema (2012) y con humedad extrema (2015). Los otros métodos de estimación de errores (d, MAE, RMSE y %RMSE) indican muy buena aproximación entre los volúmenes de escurrimiento mensuales estimados mediante el modelo de red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas y sus correspondientes valores de volúmenes registrados.

El comportamiento del pronóstico arrojado por la producción mediante el modelo de red Multilayer Perceptron de dos capas a los volúmenes de escurrimiento mensuales de ingreso a la presa Sanalona se discuten por año: período 2011-2012, año con sequías meteorológicas e hidrológicas en fases de incipiente a extrema (Figuras 3.48 y 3.49); 2013, año con sequía los primeros 8 meses y terminando con la presencia del huracán Manuel en el mes de septiembre (Figura 3.50); 2014, año con normalidad hídrica las mayor parte del tiempo con sequías y humedades incipientes a moderadas focalizadas en algunas áreas del OCPN en algunos meses (Figura 3.51) y 2015, año húmedo con desarrollo del Monzón Mexicano por influencia del fenómeno de El Niño (Figura 3.52).

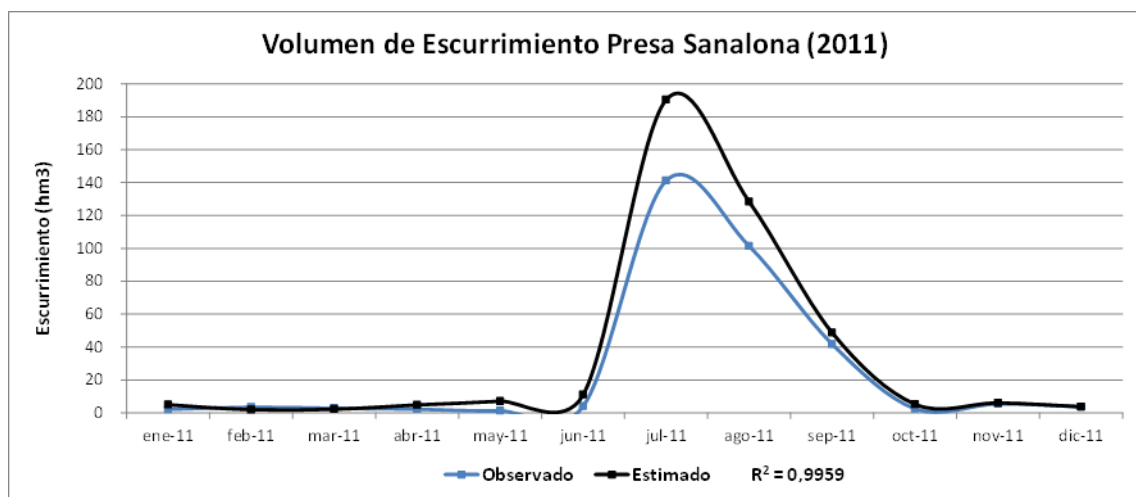


Figura 3.48: Volúmenes de ingreso mensuales Q (hm<sup>3</sup>) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa Sanalona, año 2011.

Los valores de escurrimiento mensuales observados en el año 2011 (Figura 3.48) muestran un comportamiento típico al de las normales de escurrimiento de la estación Sanalona pero con valores menores debido a la sequía; de enero a junio los valores son



muy pequeños con escurrimiento prácticamente cero, a excepción del mes de mayo que tuvo un pequeño repunte, todos los valores fueron menores a los  $5,0 \text{ hm}^3$ ; en el mes de julio se presentaron los escurrimientos más importantes de este año pero menores a los  $160 \text{ hm}^3$  ligeramente inferior a su normal, en el mes de agosto los volúmenes de escurrimiento descendieron por debajo de los  $120 \text{ hm}^3$  y en el mes de septiembre por debajo de los  $50 \text{ hm}^3$ , cuando la normal de escurrimiento de esos meses es por encima de los  $200 \text{ hm}^3$  (Figura 3.24); en octubre los volúmenes de escurrimiento disminuyeron por debajo de los  $5,0 \text{ hm}^3$ , cuando su normal es cercano a los  $50 \text{ hm}^3$ ; en los meses de noviembre y diciembre los escurrimientos fueron prácticamente nulos, cuando sus normales son del orden de los  $20 \text{ hm}^3$ . Los valores estimados mediante las redes neuronales fueron muy similares a los observados, conservando su forma y con valores muy aproximados; de enero a junio los valores estimados fueron ligeramente superiores a los observados que fueron muy bajos debido a la sequía; en julio se presentó el mayor diferencial entre el valor observado y el estimado siendo mucho mayor el estimado; en agosto y septiembre los valores estimados fueron muy similares pero ligeramente mayores a los observados; en los meses de octubre, noviembre y diciembre fueron prácticamente iguales; siguiendo la tendencia de sus normales pero con valores ligeramente inferiores, que debido a la sequía fueron prácticamente nulos.

En el año 2012, los valores de escurrimiento mensuales observados (Figura 3.49) muestran un comportamiento típico al de las normales de escurrimiento de la estación Sanalona (Figura 3.24) pero con valores menores debido a la sequía, a excepción del mes de agosto que fue superior a su normal; en los meses de enero a junio los escurrimientos fueron prácticamente nulos debido a la presencia de sequías meteorológicas extremas, generando sequías hidrológicas de moderada a extremas, en junio los niveles de la presa llegaron a su mínima expresión histórica; en cambio, en julio se presentaron escurrimientos cercanos a la normal, quedando ligeramente por debajo; en estos meses los valores estimados mediante las redes neuronales fueron ligeramente superiores a los observados. Durante el mes de agosto el valor estimado fue inferior al observado, pero muy similar al normal; en el mes de septiembre los valores de escurrimiento observados fueron prácticamente iguales; en los meses de octubre, noviembre y diciembre los valores

estimados fueron ligeramente superiores a los observados, siendo en octubre prácticamente iguales, los cuales fueron prácticamente nulos, debido a la presencia de la sequía.

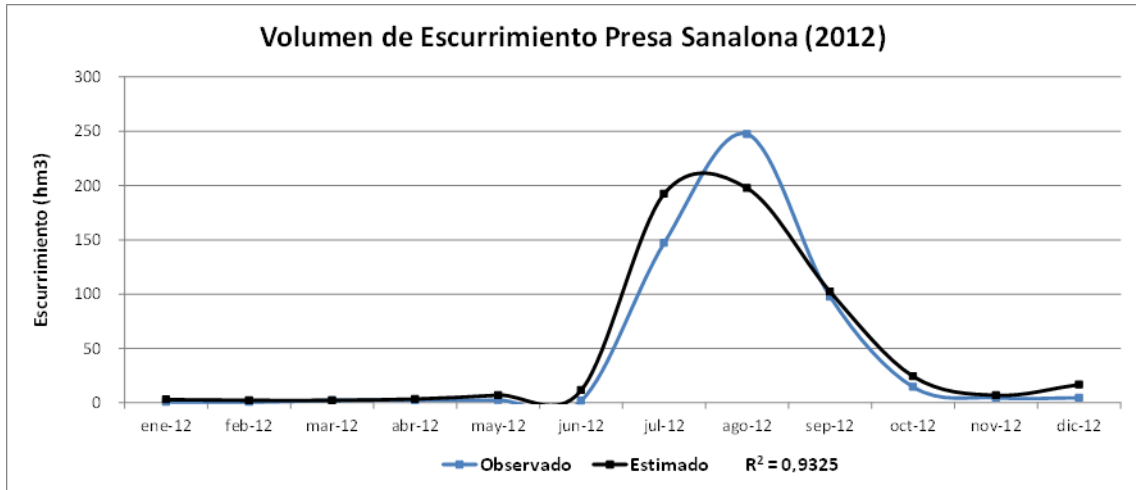


Figura 3.49: Volúmenes de ingreso mensuales  $Q$  ( $\text{hm}^3$ ) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa Sanalona, año 2012.

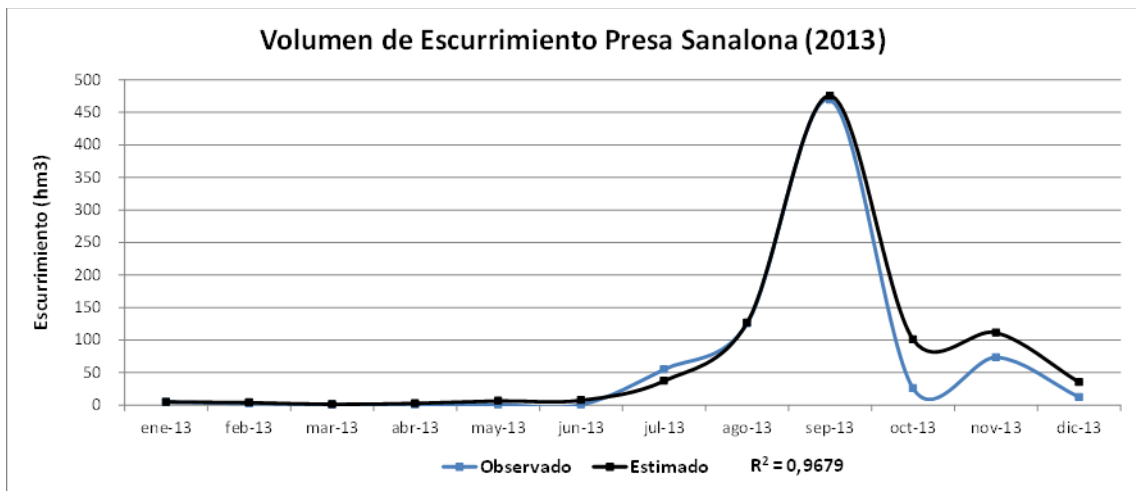


Figura 3.50: Volúmenes de ingreso mensuales  $Q$  ( $\text{hm}^3$ ) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa Sanalona, año 2013.

En el año 2013, los valores de escurrimiento mensuales observados (Figura 3.50) muestran un comportamiento atípico al de las normales de escurrimiento de la estación Sanalona (Figura 3.24); en los primeros siete meses del año la sequía continua con escurrimientos prácticamente nulos hasta el mes de junio, en julio se presentan escurrimientos muy inferiores a su normal, los valores de escurrimiento estimados y

observados fueron muy similares prácticamente iguales, a excepción de julio donde el valor observado fue mayor que el estimado pero muy pequeños debido a la sequía; en agosto y septiembre los valores estimados y observados fueron prácticamente iguales, pero con comportamientos opuestos, mientras en el mes de agosto los escurrimientos fueron de  $140 \text{ hm}^3$  muy por debajo de su normal que es ligeramente superior a los  $210 \text{ hm}^3$ , debido a la sequía, en septiembre los escurrimientos llegaron hasta los  $470 \text{ hm}^3$ , muy por encima de su normal que es aproximadamente  $200 \text{ hm}^3$ , debido a la presencia del huracán Manuel; en octubre el valor observado estuvo muy por debajo de su normal y el estimado por encima de la normal, este marcado diferencial fue debido a la sequía; en noviembre hubo una marcada recuperación de los escurrimientos, alcanzando valores cercanos a los  $100 \text{ hm}^3$  muy superiores a su normal que es menor a los  $50 \text{ hm}^3$ , pero menor a lo estimado; finalmente, en diciembre el valor estimado fue ligeramente mayor que el observado y cercanos a su normal.

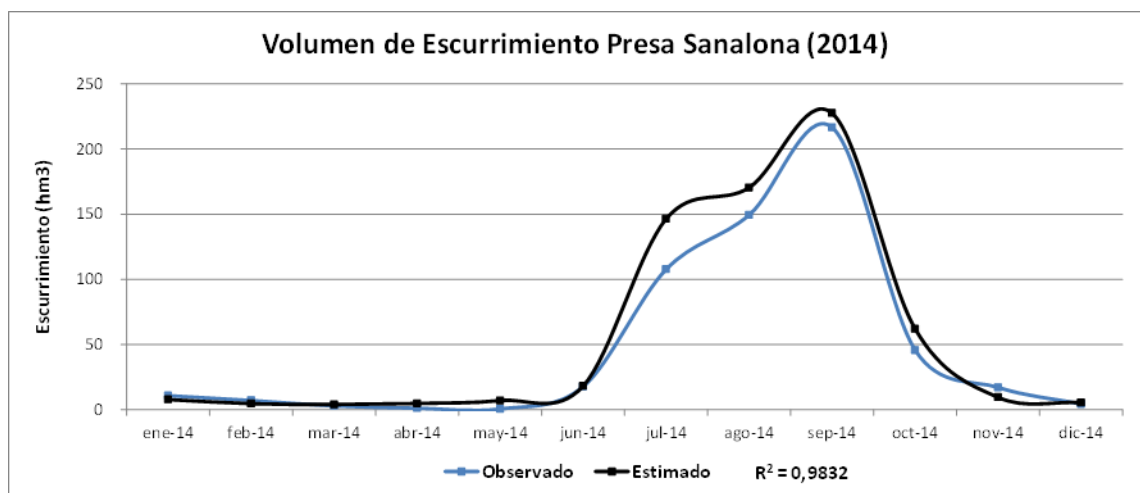


Figura 3.51: Volúmenes de ingreso mensuales  $Q$  ( $\text{hm}^3$ ) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa Sanalona, año 2014.

En el año 2014, los valores de escurrimiento mensuales observados (Figura 3.51) muestran un comportamiento diferente al de las normales de escurrimiento de la estación Sanalona en los meses de lluvias de verano (Figura 3.24); en los meses de enero a junio se presentaron escurrimientos similares a su normal de escurrimiento tendientes a cero al mes de mayo, en junio presenta escasos escurrimientos; en estos meses los valores estimados fueron muy cercanos a los valores observados; en los meses de lluvia de verano de julio a

octubre, también los valores estimados fueron superiores a los observados, el diferencia mayor se dio en el mes de julio, cuando el valor observado fue ligeramente superior a los  $100 \text{ hm}^3$  y su normal anda cerca a los  $200 \text{ hm}^3$ ; en agosto el diferencial entre ambos disminuyo alcanzando cifras cercanas a los  $150 \text{ hm}^3$ , cuando su normal es ligeramente superior a los  $200 \text{ hm}^3$ ; en septiembre los escurrimientos fueron ligeramente mayores a su normal, el diferencial entre los valores estimados y observados fue muy pequeño; en octubre los valores de los escurrimientos fueron muy similares, siendo ligeramente mayor el estimado, ambos valores fueron cercanos a la normal; en noviembre el valor estimado fue ligeramente inferior al observado, cercanos a su normal y finalmente en diciembre el valor estimado fuer prácticamente iguales al observado y por debajo de su normal.

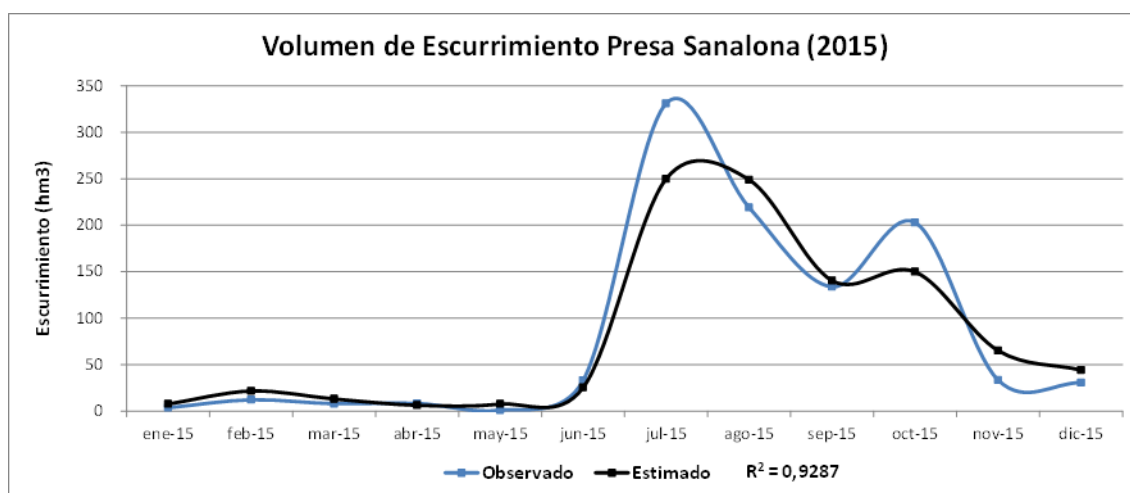


Figura 3.52: Volúmenes de ingreso mensuales  $Q$  ( $\text{hm}^3$ ) observados vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas en la presa Sanalona, año 2015.

Finalmente, en el año 2015, los valores de escurrimiento mensuales observados (Figura 3.52) muestran un comportamiento atípico al de sus normales de escurrimiento de la estación Sanalona (Figura 3.24), sobretudo de la mitad del año a diciembre; de enero a junio los escurrimientos estimados fueron muy similares a los observados y cercanos a sus normales mensuales; en julio, el valor observado ( $340 \text{ hm}^3$ ) fue muy superior a su normal que es inferior a los  $200 \text{ hm}^3$  y superior al estimado ( $200 \text{ hm}^3$ ); en agosto el valor estimado fue ligeramente superior al observado; con valores por encima de su normal; En septiembre los valores estimados y observados son coincidentes, con un valor cercano a  $150 \text{ hm}^3$ , que es un valor inferior a su normal de  $200 \text{ hm}^3$ ; octubre presento escurrimientos

de 200 hm<sup>3</sup>, lo cual es inusual para este mes cuya normal es de menos de 100 hm<sup>3</sup>, el valor estimado fue de 150 hm<sup>3</sup>, inferior al observado; noviembre y diciembre presentaron valores observados inferiores a los 50 hm<sup>3</sup> que son levemente superiores a las normales de escurrimiento, correspondientes; los valores estimados para estos meses fueron levemente superiores a los observados.

Los resultados de pronóstico de sequías hidrológicas obtenidos con esta metodología dan coeficientes de Determinación muy elevados, entre los volúmenes de escurrimiento mensual estimados mediante el modelo de red Perceptron Multilayer de dos capas y los observados, similares o mejores a los obtenidos por otros investigadores del proceso lluvia-escurrimiento en el pronóstico de escurrimientos como (Mittal *et al.*, 2012), (Hu *et al.*, 2014), (Mutlu *et al.*, 2008), (Pierini *et al.*, 2012), (Dolling and Varas, 2002) y (Quisque *et al.*, 2013).

Los resultados del pronóstico de escurrimientos mensuales de ingreso a las presas El Varejonal y Sanalona, mediante el modelo de red neuronal Perceptron Multilayer de dos capas, para el período 2011-2015, fue comparado con los valores pronosticados mediante una función de distribución de probabilidad con ocurrencia al 98%, utilizada para el diseño del Plan de Riego del Distrito Riego #010 (OCPN, 2017) y con los valores observados en los meses de dichos períodos; en ambos casos, las redes neuronales dieron un pronóstico más acertado a los valores observados que los estimados por las Función de Distribución de Probabilidad al 98%, Tabla 3.16 y Figuras 3.53 (Figura 3.53 a y Figura 3.53 b para las presas Sanalona y El Varejonal, respectivamente).

Tabla 3.16: Evaluación del pronóstico de volúmenes de escurrimiento mensual de ingreso a las presas El Varejonal y Sanalona Q (hm<sup>3</sup>/mes), mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas, la Función de Distribución de Probabilidad de ocurrencia al 98 % y los valores observados, para el período 2011-2015, utilizando los criterios: R<sup>2</sup>, MAE, MRSE, d y %MRSE, (n=60).

Comparación de Escurrimientos Sanalona				Comparación de Escurrimientos El Varejonal			
Fecha	Valor Real	Plan de Riego	Redes Neuronales	Fecha	Valor Real	Plan de Riego	Redes Neuronales
ene-11	2,14	0,58	4,91	ene-11	8,49	8,26	4,91
feb-11	3,40	17,86	1,88	feb-11	10,35	5,32	1,88
mar-11	2,80	1,64	2,21	mar-11	2,68	4,49	2,21
abr-11	2,23	1,38	4,83	abr-11	5,57	2,75	4,83
may-11	1,17	1,03	7,06	may-11	16,75	0,42	7,06
jun-11	4,05	7,12	11,00	jun-11	12,32	2,47	11,00
jul-11	141,20	62,25	190,37	jul-11	246,29	86,14	190,37
ago-11	101,40	110,54	128,43	ago-11	178,41	292,07	128,43
sep-11	41,79	85,95	48,73	sep-11	70,07	88,08	48,73
oct-11	2,51	1,73	5,23	oct-11	12,21	18,05	5,23
nov-11	5,51	0,64	6,07	nov-11	14,61	9,50	6,07
dic-11	3,72	0,76	3,73	dic-11	11,57	8,85	3,73
ene-12	0,67	0,42	2,85	ene-12	6,79	7,17	2,85
feb-12	0,48	17,71	2,18	feb-12	6,51	4,34	2,18
mar-12	2,19	1,64	2,18	mar-12	4,02	4,49	2,18
abr-12	2,22	1,38	3,32	abr-12	1,30	2,75	3,32
may-12	2,37	1,03	6,98	may-12	6,64	0,42	6,98
jun-12	1,76	6,90	11,39	jun-12	12,23	0,91	11,39
jul-12	147,04	60,81	192,37	jul-12	282,83	78,90	192,37
ago-12	247,40	109,39	197,59	ago-12	376,45	284,93	197,59
sep-12	97,68	85,29	102,24	sep-12	236,66	84,57	102,24
oct-12	14,54	2,31	24,29	oct-12	61,61	18,33	24,29
nov-12	4,44	0,85	6,78	nov-12	13,14	9,61	6,78
dic-12	4,45	1,01	16,73	dic-12	21,02	9,02	16,73
ene-13	4,68	0,48	4,91	ene-13	28,44	7,29	4,91
feb-13	2,35	17,80	3,84	feb-13	2,84	4,50	3,84
mar-13	0,70	1,64	1,20	mar-13	2,94	4,49	1,20
abr-13	0,48	1,38	2,75	abr-13	1,36	2,75	2,75
may-13	0,48	1,03	6,40	may-13	0,77	0,42	6,40
jun-13	0,44	7,07	7,31	jun-13	7,82	1,64	7,31
jul-13	55,02	61,83	37,16	jul-13	106,01	82,41	37,16
ago-13	125,65	110,02	126,59	ago-13	274,52	288,24	126,59
sep-13	469,53	85,65	475,48	sep-13	1032,89	86,00	475,48
oct-13	25,52	2,82	100,72	oct-13	67,71	20,51	100,72
nov-13	73,45	1,09	111,53	nov-13	92,81	10,21	111,53
dic-13	12,24	1,25	35,15	dic-13	20,66	9,85	35,15
ene-14	10,77	0,71	7,79	ene-14	24,84	7,87	7,79
feb-14	7,11	17,95	4,61	feb-14	11,08	4,99	4,61
mar-14	2,91	1,64	4,01	mar-14	4,28	4,49	4,01
abr-14	1,12	1,38	4,79	abr-14	2,09	2,75	4,79
may-14	0,64	1,03	7,06	may-14	2,86	0,42	7,06
jun-14	17,74	7,23	18,20	jun-14	31,93	2,28	18,20
jul-14	107,73	62,68	146,46	jul-14	266,96	85,36	146,46
ago-14	149,42	110,92	170,50	ago-14	462,18	291,15	170,50
sep-14	216,70	86,07	227,58	sep-14	527,07	87,59	227,58
oct-14	45,72	2,71	61,98	oct-14	110,26	21,50	61,98
nov-14	17,14	0,98	9,50	nov-14	38,45	10,46	9,50
dic-14	4,41	1,09	5,42	dic-14	20,74	10,15	5,42
ene-15	3,63	0,60	7,58	ene-15	6,92	8,06	7,58
feb-15	12,15	17,85	21,64	feb-15	84,79	5,13	21,64
mar-15	7,93	1,64	13,05	mar-15	44,99	4,49	13,05
abr-15	8,33	1,38	6,24	abr-15	16,31	2,75	6,24
may-15	1,07	1,03	7,52	may-15	4,65	0,42	7,52
jun-15	33,05	7,00	25,34	jun-15	43,11	2,58	25,34
jul-15	331,07	61,49	249,93	jul-15	491,01	86,80	249,93
ago-15	219,10	109,78	248,98	ago-15	366,11	292,76	248,98
sep-15	133,81	85,54	140,39	sep-15	324,34	88,44	140,39
oct-15	202,86	2,84	149,87	oct-15	230,59	22,21	149,87
nov-15	33,40	1,05	65,06	nov-15	29,57	10,66	65,06
dic-15	30,53	1,19	44,19	dic-15	42,67	10,40	44,19
Método de error	R <sup>2</sup>	0,5197	0,9431	Método de error	R <sup>2</sup>	0,3591	0,9315
	d	0,6461	0,9843		d	0,6001	0,8403
	MAE	33,8557	13,1953		MAE	69,2520	52,4846
	RMSE	75,5199	22,5543		RMSE	161,5593	109,3828
	%MRSE	141,3337	42,2099		%MRSE	150,4022	101,8289

En la Tabla 3.16, se observa que los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) entre los valores estimados mediante la red Perceptron Multilayer de dos capas y los valores observados en las presas Sanalona y El Varejonal para el período 2011-2015, son superiores a 0,93, lo cual indica muy buena producción del pronóstico; en cambio, los coeficientes de Determinación para los valores estimados mediante la Función de Distribución de probabilidad al 98% son menores al 52%. Lo confirman los valores más bajos de los errores estimados mediante los criterios:  $R^2$ , d, MAE, RMSE y % RMSE.

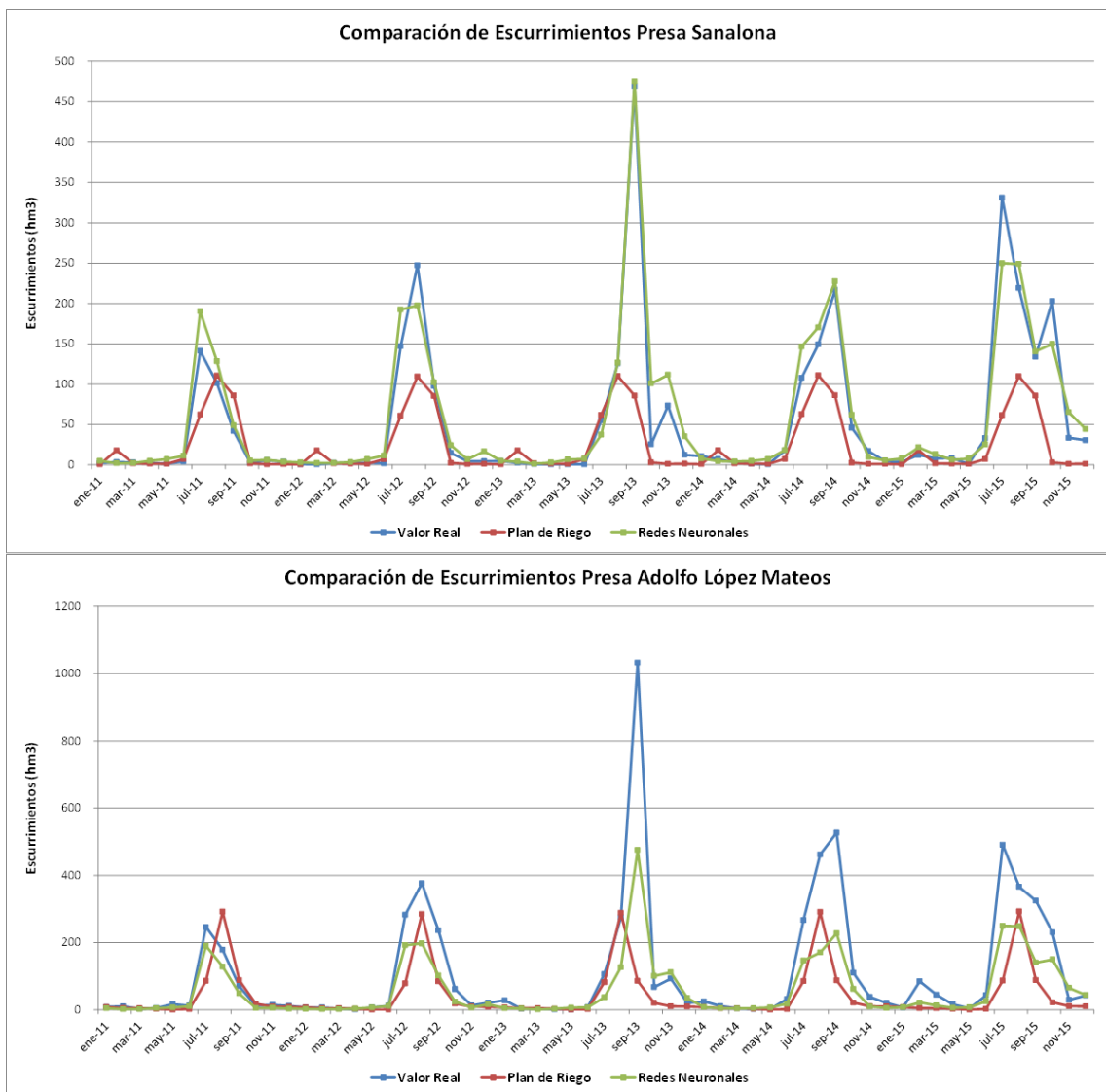


Figura 3.53: Volúmenes de ingreso mensuales  $Q$  ( $hm^3$ ) observados (Azul) vs estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas (Verde) y la Función de Distribución de Probabilidad al 98% (Rojo), para las presas a) Sanalona y b) El Varejonal, período 2011-2015.

El análisis del comportamiento de los volúmenes de ingreso observados a las presas Sanalona y Varejonal (Figuras 3.53 a y 3.53 b), muestran de forma clara los períodos secos (2011-2012), año seco con la ocurrencia de un ciclón (huracán Manuel, 2013), año con normalidad hídrica y año húmedo (2015); en ambos casos, prácticamente en todo el período los volúmenes estimados con la Función de Distribución (FDP) al 98% de ocurrencia fue menor que lo observado, a excepción del mes de septiembre de 2011, donde los escurrimientos de ese mes fueron muy escasos debido a la ocurrencia de la sequía, se observa que los valores proporcionados por la FDP están subvaluados con respecto a la realidad. En cambio, los valores estimados mediante las redes neuronales fueron muy similares a los observados, en todo el período; salvo pocas excepciones, como las ocurridas para presa Sanalona en julio de 2011 donde se sobrevaluo el pronóstico, agosto de 2012 y agosto de 2015 en donde lo observado supero a lo pronosticado de forma notable; en el caso de la presa Varejonal, las excepciones fueron julio de 2011, julio a octubre de 2012, septiembre de 2013, julio a septiembre de 2014 y julio a octubre de 2015, en donde lo estimado fue muy inferior a lo observado, debido a que fueron años o meses muy húmedos.

Con los resultados de los pronósticos de los escurrimientos mensuales de ingreso a las presas El Varejonal y Sanalona, discutidos en la sección antecedente, para el período 2011-2015, se pronosticaron los volúmenes de almacenamiento al primer día de cada mes mediante balance de aguas, considerando los volúmenes pronosticados de ingreso a los vasos de las presas, los volúmenes de extracción del Plan de Riegos (OCPN, 2017) como se ilustra para la presa Sanalona en el Anexo 4 y el volumen existente en el vaso cada mes. Los volúmenes de almacenamiento ( $\text{hm}^3$ ) pronosticados fueron comparados con los valores observados; en ambos casos, las redes neuronales dieron un pronóstico más acertado a los valores observados que los estimados por las Función de Distribución de Probabilidad al 98%, Tabla 3.17 y Figuras 3.54 (Figura 3.54 a y Figura 3.54 b para las presas Sanalona y El Varejonal, respectivamente).



Tabla 3.17: Evaluación del pronóstico de volúmenes de almacenamiento al primer día de cada mes en las presas El Varejonal y Sanalona Q (hm<sup>3</sup>/mes), mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas, la Función de Distribución de Probabilidad de ocurrencia al 98 % y los valores observados, para el período 2011-2015, utilizando los criterios: R<sup>2</sup>, MAE, MRSE, d y %MRSE, (n=60).

Comparación de Almacenamientos Sanalona				Comparación de Almacenamientos El Varejonal			
Fecha	Valor Real	Plan de Riego	Redes Neuronales	Fecha	Valor Real	Plan de Riego	Redes Neuronales
ene-11	337,80	342,40	309,45	ene-11	1748,10	1664,56	1645,34
feb-11	286,60	283,93	283,66	feb-11	1551,90	1420,22	1518,91
mar-11	256,20	225,33	212,03	mar-11	1356,60	1166,44	1310,15
abr-11	224,40	168,61	200,04	abr-11	1159,80	859,00	1063,33
may-11	163,10	131,01	190,25	may-11	917,50	645,32	968,68
jun-11	90,30	101,62	139,74	jun-11	621,50	552,27	850,65
jul-11	47,10	94,59	87,14	jul-11	399,60	521,31	615,02
ago-11	189,60	148,26	228,89	ago-11	644,90	586,63	675,16
sep-11	294,60	252,09	311,32	sep-11	809,70	860,01	778,24
oct-11	326,80	331,78	337,07	oct-11	843,90	929,49	826,63
nov-11	278,20	276,69	280,20	nov-11	672,20	718,50	719,63
dic-11	223,30	255,11	262,05	dic-11	548,40	504,78	476,20
ene-12	206,70	190,88	162,04	ene-12	450,10	348,24	426,93
feb-12	181,60	133,23	151,48	feb-12	383,40	261,07	380,44
mar-12	137,00	102,86	135,70	mar-12	305,50	189,02	340,03
abr-12	80,50	69,13	103,80	abr-12	188,40	133,34	267,05
may-12	34,30	63,24	76,55	may-12	71,30	107,65	177,60
jun-12	17,60	47,78	24,79	jun-12	52,00	89,94	73,84
jul-12	16,00	41,67	15,98	jul-12	51,90	75,09	71,81
ago-12	164,40	91,21	197,10	ago-12	328,80	141,20	389,70
sep-12	415,10	189,63	351,01	sep-12	701,70	412,79	657,53
oct-12	507,20	264,11	506,54	oct-12	923,00	481,50	886,57
nov-12	497,80	430,33	452,32	nov-12	914,70	813,66	842,66
dic-12	445,00	338,03	411,43	dic-12	814,30	612,91	736,61
ene-13	387,40	257,96	380,65	ene-13	712,47	456,13	690,84
feb-13	296,68	219,74	353,62	feb-13	697,02	394,59	683,19
mar-13	205,40	200,33	263,30	mar-13	579,42	334,89	655,37
abr-13	130,60	149,02	153,65	abr-13	395,77	291,53	549,62
may-13	89,56	115,06	98,01	may-13	246,17	275,22	393,98
jun-13	69,98	85,95	65,81	jun-13	190,26	257,79	244,68
jul-13	74,84	75,64	59,90	jul-13	190,82	241,76	198,37
ago-13	176,22	124,07	98,60	ago-13	417,37	309,78	329,19
sep-13	329,26	222,23	290,96	sep-13	749,29	583,10	486,87
oct-13	674,82	296,77	793,63	oct-13	1617,76	652,23	1648,32
nov-13	686,93	629,82	718,29	nov-13	1599,32	1464,00	1568,05
dic-13	695,01	549,48	717,03	dic-13	1585,09	1289,64	1550,02
ene-14	674,37	467,70	647,13	ene-14	1536,09	1111,04	1433,12
feb-14	538,38	385,51	599,26	feb-14	1411,59	962,97	1415,14
mar-14	390,80	327,95	467,48	mar-14	1232,60	758,51	1226,87
abr-14	276,75	245,24	310,47	abr-14	953,22	578,69	1068,72
may-14	197,85	164,71	199,63	may-14	752,71	522,80	912,03
jun-14	162,28	137,56	176,72	jun-14	671,77	475,13	723,57
jul-14	174,09	120,82	156,51	jul-14	692,33	450,56	703,03
ago-14	282,19	167,03	304,09	ago-14	961,25	517,35	1022,00
sep-14	431,62	265,51	440,25	sep-14	1417,54	790,39	1301,57
oct-14	646,80	339,76	647,38	oct-14	1942,82	859,39	1940,55
nov-14	624,63	538,77	598,05	nov-14	1960,84	1799,56	1830,11
dic-14	506,41	442,34	536,72	dic-14	1810,38	1575,10	1765,75
ene-15	457,55	357,06	425,45	ene-15	1689,44	1347,58	1599,35
feb-15	357,37	280,35	387,82	feb-15	1537,67	1153,65	1512,68
mar-15	302,69	191,85	272,67	mar-15	1464,70	931,95	1397,13
abr-15	195,14	77,94	200,18	abr-15	1286,28	742,28	1331,97
may-15	148,88	69,82	191,88	may-15	1080,96	636,77	1195,15
jun-15	136,16	68,54	154,08	jun-15	1011,59	597,50	1051,17
jul-15	170,41	61,07	147,03	jul-15	1054,29	575,85	1028,66
ago-15	499,59	112,14	409,93	ago-15	1554,26	643,28	1486,57
sep-15	695,01	211,61	738,26	sep-15	1909,15	917,05	2109,87
oct-15	693,66	283,00	821,24	oct-15	2230,20	986,07	2280,08
nov-15	690,52	598,32	745,35	nov-15	2396,25	2099,01	2202,52
dic-15	636,57	510,33	666,54	dic-15	2246,94	1848,85	2183,65
CDE	R <sup>2</sup>	0,7112	0,9641	CDE	R <sup>2</sup>	0,7774	0,9778
	d	0,8438	0,9899		d	0,8664	0,9938
	MAE	94,9075	32,6111		MAE	296,9287	71,0195
	RMSE	142,5357	41,9627		RMSE	403,6817	92,6752
	%RMSE	44,7110	13,1630		%RMSE	40,2041	9,2299

En la Tabla 3.17, se observa que los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) entre los valores estimados mediante la red Perceptron Multilayer de dos capas y los valores observados en las presas Sanalona y El Varejonal para el período 2011-2015, son superiores a 0,96, lo cual indica un buen pronóstico de los volúmenes de almacenamiento al primer día de cada mes; en cambio, los coeficientes de correlación para los valores estimados mediante la Función de Distribución de probabilidad al 98% son menores a 0,78. Lo confirman los valores más bajos de los errores estimados mediante los criterios:  $R^2$ , d, MAE, RMSE y % RMSE.

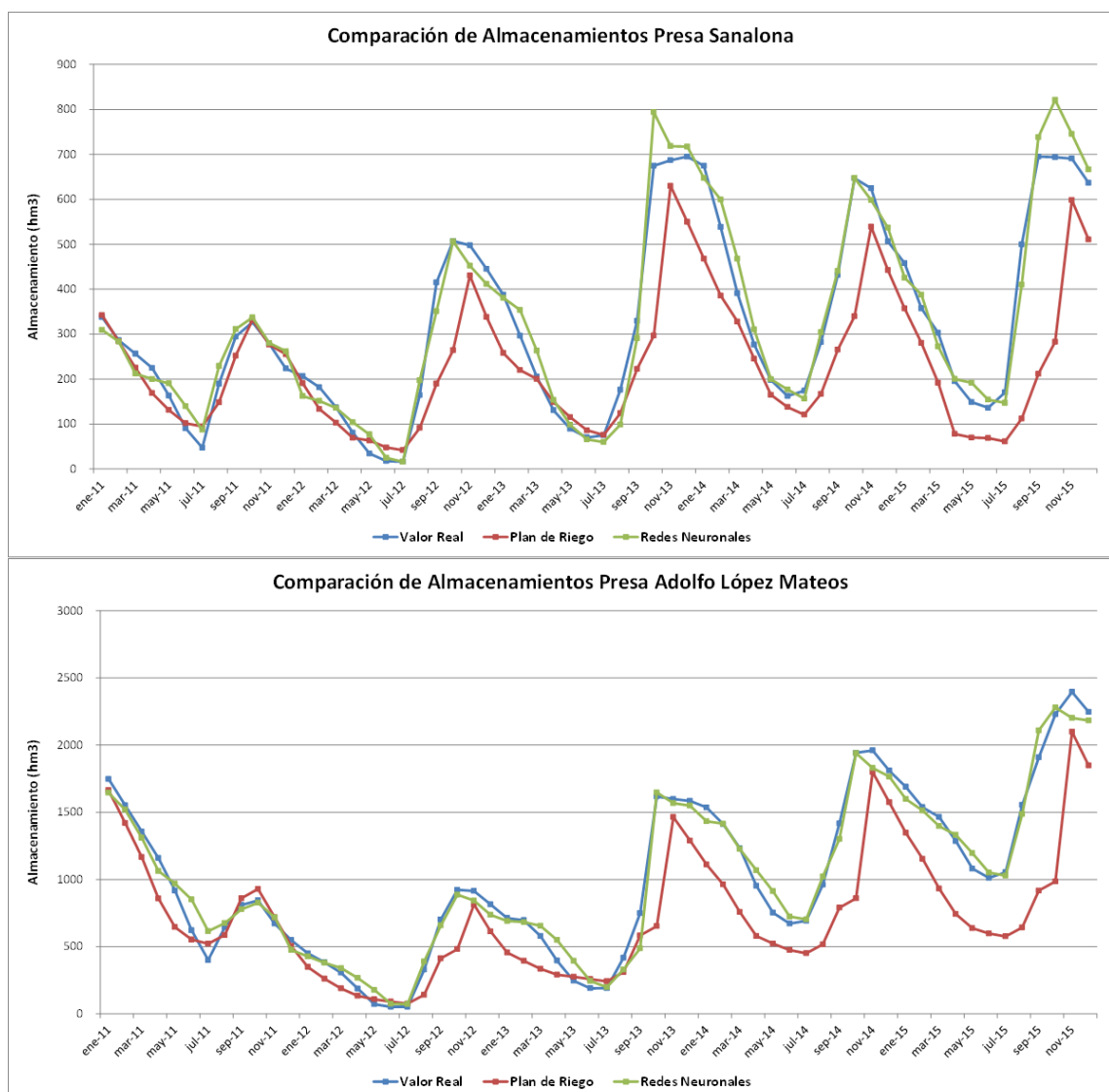


Figura 3.54: Volúmenes de almacenamiento al primer día de cada mes V ( $\text{hm}^3$ ) observados (Azul) vs estimados utilizando los pronósticos obtenido mediante Redes Neuronales (Verde) y la FDP al 98% (Rojo), para las presas a) Sanalona y b) El Varejonal, período 2011-2015.

El análisis del comportamiento de los volúmenes de almacenamiento al primer día de cada mes observados en las presas Sanalona y Varejonal (Figuras 3.54a y 3.54b), muestran de forma clara los períodos secos (2011-2012), año seco con la ocurrencia de un ciclón (Huracán Manuel, 2013), año con normalidad hídrica y año húmedo (2015); en ambos casos, prácticamente en todo el período los volúmenes estimados con la Función de Distribución (FDP) al 98% de ocurrencia fue menor que lo observado, a excepción de los meses de julio de 2011; mayo, junio y julio de 2012 y mayo a julio de 2013, donde los escurrimientos de estos meses fueron muy escasos debido a la ocurrencia de la sequía, se observa que en la mayoría de los casos los valores proporcionados por la FDP están subvaluados con respecto a la realidad. En cambio, los valores estimados mediante las redes neuronales fueron muy similares a los observados, en todo el período; salvo pocas excepciones, como las ocurridas para presa Sanalona en julio de 2011 donde se sobrevaluo el pronóstico, noviembre de 2013 y octubre de 2015 en donde la observado supero a lo pronosticado de forma notable; en el caso de la presa Varejonal, las excepciones fueron julio de 2011, abril a mayo de 2012, mayo a junio de 2013, abril a junio de 2014 y mayo de 2015, en donde lo estimado fue notablemente superior a lo observado, y noviembre de 2014 y noviembre de 2015, donde lo observado supero al pronóstico, debido a que fueron años o meses muy húmedos.

### **Índice SDI**

El pronóstico de los índices de escurrimiento SDI se llevó a cabo de dos formas, la primera de ellas considerando como datos de entrada únicamente los índices y como producción de salida los índices SDI de los siguientes tres meses, los resultados no fueron precisos, como lo indica el coeficiente de determinación ( $R^2=0,37$ ) en la Figura 3.55, correspondiente a los pronósticos del SDI para la presa El Varejonal, período 2010-2015; la segunda es considerando los resultados del pronóstico de los escurrimientos mensuales pronosticados mediante el modelo de red neuronal Multilayer Perceptron de dos capas, presentados en las secciones antecedentes, y estimados mediante el programa SDI.xlsx, utilizado en la sección de monitoreo de sequías hidrológicas; obteniendo resultados más asertivos, como lo indican los resultados de la Tabla 3.18 y Figuras 3.56.

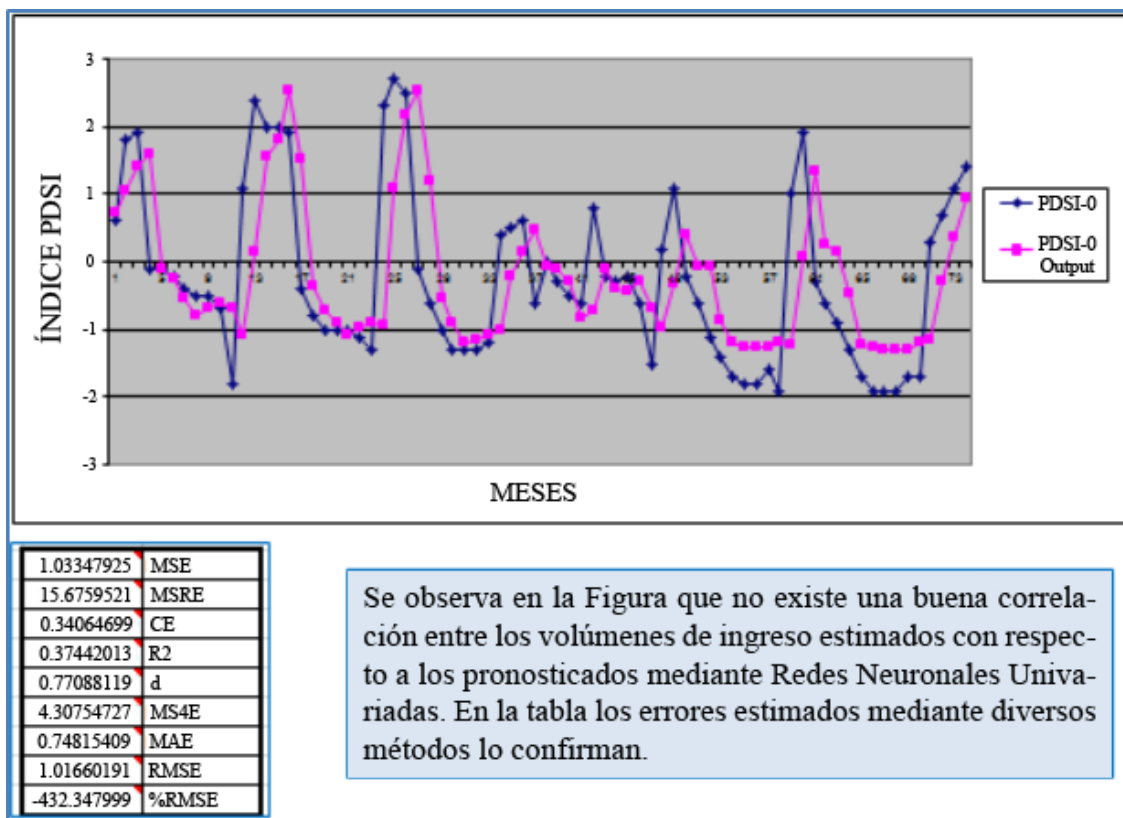


Figura 3.55: SDI mensual observados (Azul) vs estimados mediante Redes Neuronales Univariadas (Magenta) para la presa El Varejonal, período 2010-2015.

En la Tabla 3.18, se muestra que los índices de escurrimiento SDI estimados tienen alta correlación con los observados en la presa Sanalona ( $R^2=0,70$ ) y mediana correlación en la presa El Varejonal ( $R^2=0,40$ ), no obstante en la mayoría de los casos coincide en la fase de clasificación, principalmente en la presa Sanalona, lo cual se muestra en las Figuras 3.56.

La variabilidad de los SDI estimados y su correlación con los observados depende de las condiciones de sequías hidrológicas existentes en el período analizado, en este caso se presentaron los tres casos, años con sequía de incipiente a extrema en los años 2011-2012, normalidad hídrica en el año 2014 y fases de humedad incipiente a extrema en los años del 2013 al 2015; este índice permitió identificar y caracterizar las sequías hidrológicas ante estas condiciones al utilizar intervalos de agregación de 9 a 12 meses.

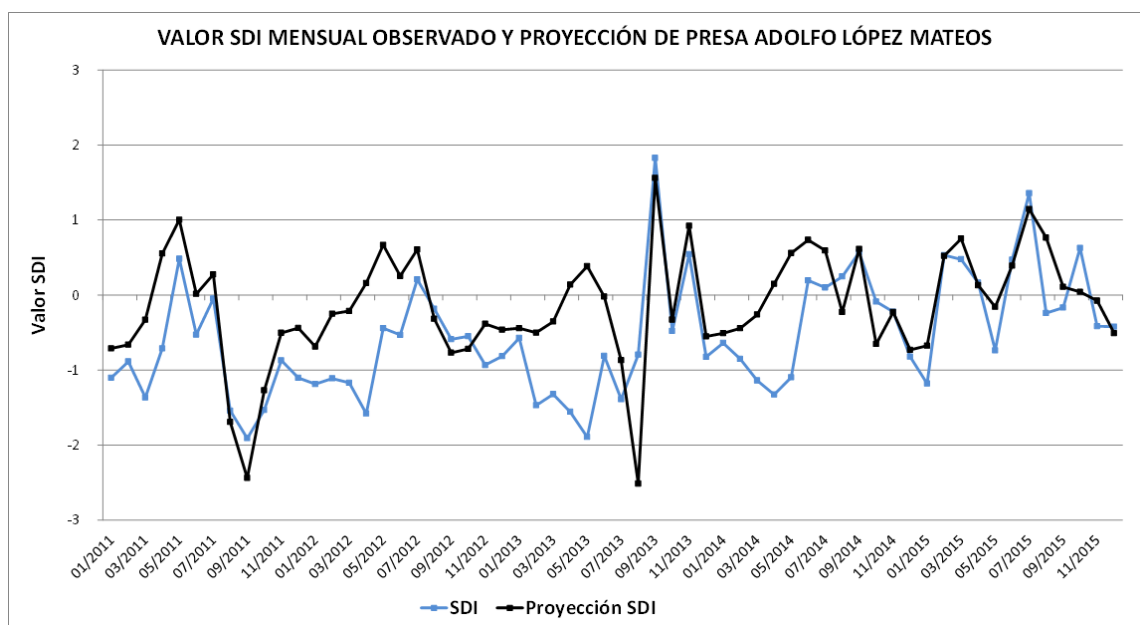
Los resultados de los pronósticos indican que el SDI puede ser utilizado para el análisis de sequías hidrológicas y en la planeación de medidas preventivas ante futuras ocurrencias de sequías hidrológicas en el OCPN, para lo cual se debe de tener en cuenta la tendencia que representen los registros de períodos de sequías hidrológicas y sus características, ya que tienen gran influencia en la determinación de su ocurrencia o no (Vicario *et al.*, 2014).

Tabla 3.18: Evaluación del pronóstico del SDI mensual en las presas El Varejonal y Sanalona, estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas vs los valores observados, para el período 2011-2015, utilizando los criterios:  $R^2$ , MAE, MRSE, d y %MRSE, (CDE) (n=60).

Proyecciones SDI de Presas									
Fecha	Presa El Varejonal		Presa Sanalona		Fecha	Presa El Varejonal		Presa Sanalona	
	Observado	Proyección	Observado	Proyección		Observado	Proyección	Observado	Proyección
ene-11	-1.10	-0.71	-0.94	-0.64	oct-13	-0.48	-0.33	-0.39	0.72
feb-11	-0.89	-0.66	-0.37	-0.62	nov-13	0.54	0.92	1.39	1.84
mar-11	-1.37	-0.33	-0.29	-0.42	dic-13	-0.82	-0.55	-0.23	0.48
abr-11	-0.71	0.55	-0.19	0.23	ene-14	-0.64	-0.51	-0.26	-0.43
may-11	0.48	1.00	-0.05	0.92	feb-14	-0.85	-0.44	0.00	-0.22
jun-11	-0.53	0.01	-0.31	0.23	mar-14	-1.14	-0.26	-0.27	-0.11
jul-11	-0.05	0.27	0.15	0.64	abr-14	-1.33	0.15	-0.52	0.23
ago-11	-1.54	-1.69	-1.29	-0.86	may-14	-1.10	0.56	-0.31	0.92
sep-11	-1.91	-2.44	-1.78	-1.63	jun-14	0.19	0.73	0.60	0.59
oct-11	-1.53	-1.27	-1.59	-1.30	jul-14	0.10	0.59	-0.26	0.20
nov-11	-0.87	-0.51	-0.63	-0.58	ago-14	0.25	-0.23	-0.57	-0.31
dic-11	-1.10	-0.44	-0.84	-0.86	sep-14	0.57	0.61	0.32	0.39
ene-12	-1.19	-0.69	-1.33	-0.86	oct-14	-0.09	-0.65	0.03	0.26
feb-12	-1.11	-0.25	-1.11	-0.56	nov-14	-0.22	-0.23	0.06	-0.33
mar-12	-1.17	-0.21	-0.42	-0.42	dic-14	-0.82	-0.73	-0.76	-0.69
abr-12	-1.58	0.16	-0.19	0.01	ene-15	-1.18	-0.68	-0.74	-0.44
may-12	-0.44	0.67	0.30	0.91	feb-15	0.53	0.52	0.33	0.73
jun-12	-0.53	0.25	-0.69	0.25	mar-15	0.48	0.75	0.33	0.69
jul-12	0.21	0.61	0.22	0.65	abr-15	0.16	0.13	0.64	0.41
ago-12	-0.18	-0.32	0.49	0.00	may-15	-0.74	-0.16	-0.09	0.97
sep-12	-0.59	-0.77	-0.82	-0.77	jun-15	0.47	0.39	1.13	0.87
oct-12	-0.55	-0.72	-0.74	-0.44	jul-15	1.36	1.15	1.73	1.13
nov-12	-0.93	-0.38	-0.74	-0.52	ago-15	-0.24	0.76	0.22	0.52
dic-12	-0.82	-0.46	-0.76	-0.06	sep-15	-0.17	0.11	-0.41	-0.35
ene-13	-0.57	-0.44	-0.64	-0.64	oct-15	0.63	0.04	1.55	1.16
feb-13	-1.47	-0.50	-0.53	-0.31	nov-15	-0.42	-0.08	0.59	1.19
mar-13	-1.32	-0.35	-0.91	-0.69	dic-15	-0.42	-0.51	0.39	0.67
abr-13	-1.56	0.14	-0.86	-0.10					
may-13	-1.89	0.38	-0.42	0.85					
jun-13	-0.81	-0.02	-1.19	-0.02					
jul-13	-1.39	-0.87	-1.14	-1.58					
ago-13	-0.80	-2.51	-0.90	-0.89					
sep-13	1.83	1.56	1.76	1.77					
						$R^2$	0.4043	$R^2$	0.6991
						d	0.7567	d	0.8817
						MAE	0.5813	MAE	0.4050
						RMSE	0.7666	RMSE	0.5190
						%RMSE	-137.8286	%RMSE	-218.0199

En las Figuras 3.56, se comparan los resultados de los SDI mensuales observados (Azul) vs estimados (Negro), para las presas a) Sanalona y b) El Varejonal, período 2011-

2015. Se aprecia que en lo general en ambas presas el valor estimado fue sobrevaluado con respecto a la realidad; en la presa Sanalona los diferenciales entre los valores estimados y los observados fueron menores que en la presa El Varejonal. La mayoría de los valores estimados de SDI coincidieron con los observados en la misma fase de sequía, normalidad o humedad; en cambio, en la presa El Varejonal los diferenciales fueron mayores por lo que muchos de estos valores estimados cayeron en fases de sequía diferentes a las ocurridas. En todos los casos los valores de SDI de ambas presas, ocurrieron entre las fases de sequía incipiente a humedad incipiente en la presa Sanalona y entre las fases de sequía moderada a humedad incipiente en El Varejonal.



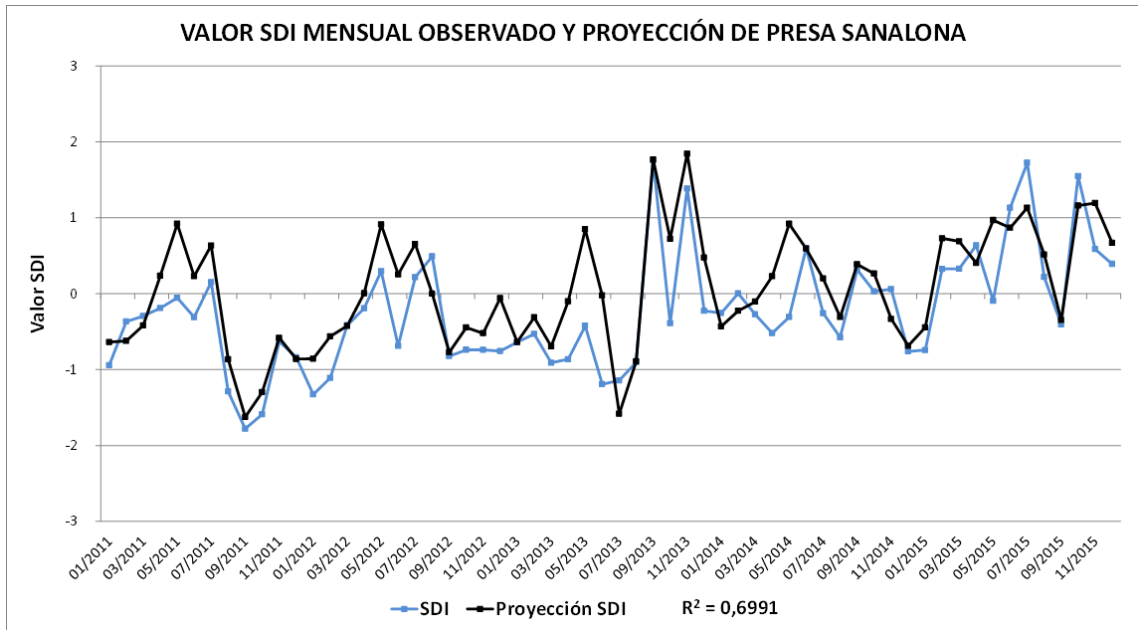


Figura 3.56: SDI mensuales observados (Azul) vs estimados (Negro), para las presas a) Sanalona y b) El Varejonal, período 2011-2015.

## Índice Ie

El pronóstico de los índices de estado de las presas Ie se llevó a cabo considerando el nivel que alcanzarían los vasos de las presas Sanalona y El Varejonal al primer día de cada mes, considerando los volúmenes de escurrimiento mensual de ingreso al vaso de las presas, pronosticados en la sección anterior y mediante la aplicación del balance de aguas para los siguientes meses. Para la estimación de los índices de estado Ie se utilizó el programa Ie.xlsx, que fue usado en la estimación del Ie en el monitoreo de sequías hidrológicas en las secciones antecedentes. Los resultados del pronóstico fueron altamente asertivos al obtener un Coeficiente de determinación de  $R^2=0,94$  y  $R^2=0,97$  en las presas Sanalona y Varejonal, respectivamente, como se ilustran e indican en las Figuras 3.57 y Tabla 3.19.

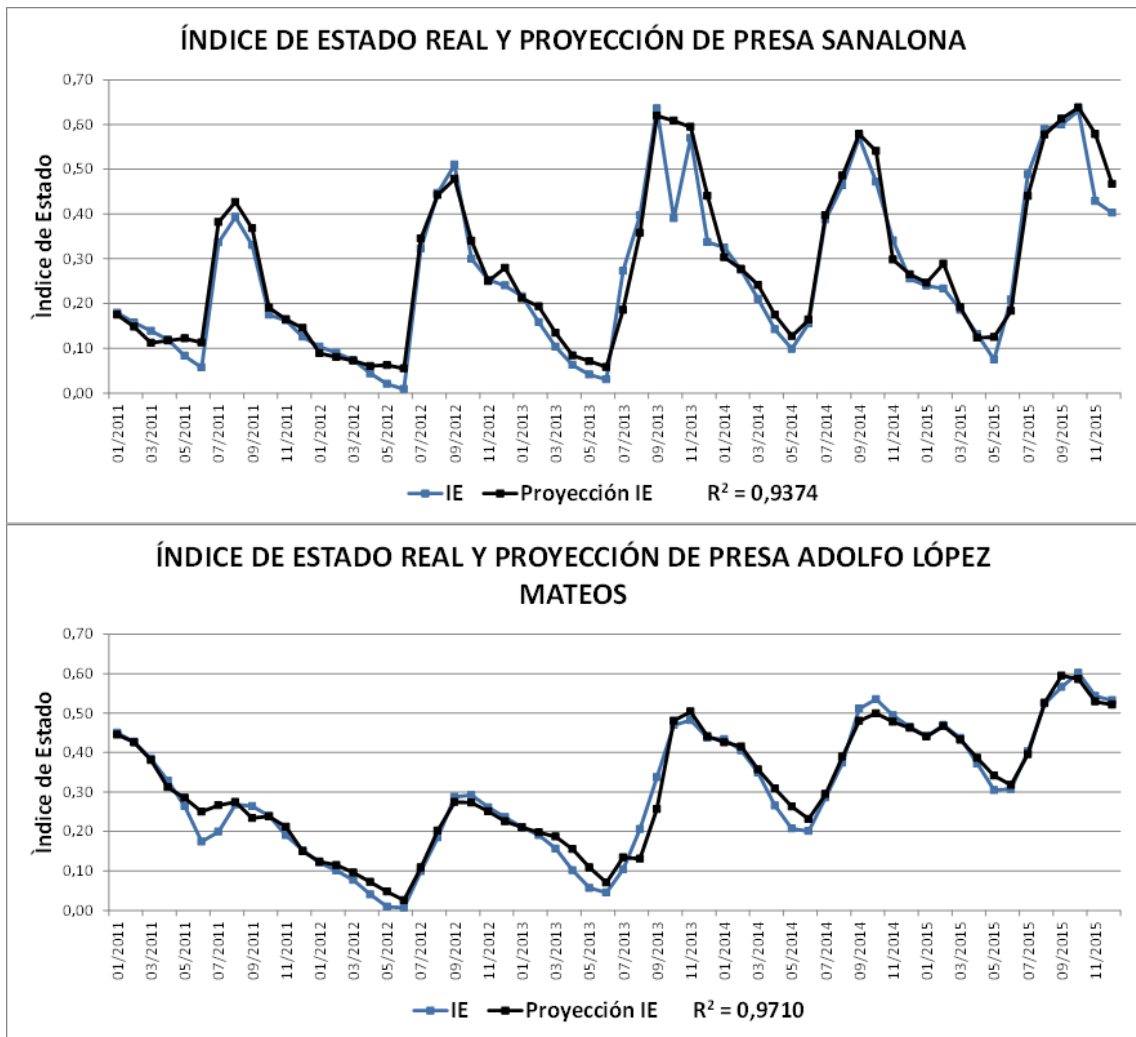


Figura 3.57: IE mensuales observados (Azul) vs estimados (Negro), para las presas a) Sanalona y b) El Varejonal, período 2011-2015.

En las Figuras 3.57, se muestran la variabilidad de los Ie estimados y su correlación con los observados para diferentes condiciones de sequías hidrológicas ocurridas en el período 2011-2015; en el período analizado se presentaron las condiciones: años con sequía de incipiente a extrema (2011-2012), normalidad hídrica (2014) y fases de humedad incipiente a extrema en años húmedos (2013 y 2015); este índice permitió identificar y caracterizar las sequías hidrológicas en los vasos de las presas ante diferentes condiciones de volúmenes de escurrimiento de ingreso a las presas, volúmenes de almacenamiento y volúmenes de extracción comprometidos aguas abajo, entre ellos los del Plan de Riego del Distrito de Riego 010.



En ambos casos, los índices de estado  $I_e$  de las presas Varejonal (Figura 3.57a) y Sanalona (Figura 3.57b) son muy similares a los observados a excepción de los ocurridos en la presa Sanalona en octubre de 2013 y octubre de 2014, en donde los volúmenes estimados fueron inferiores a los observados. En la mayoría de los valores estimados fueron ligeramente superiores a los observados.

En la Figura 3.57a, se observa que el comportamiento de los volúmenes almacenados en la presa Sanalona presenta un comportamiento cíclico en cuanto a que en el inicio del ciclo agrícola que inicia en octubre los volúmenes se encuentran en su máxima capacidad almacenada después de la lluvias de verano y estos descienden conforme avanzan los riegos comprometidos en el Plan de Riegos del DR010, hasta llegar a un mínimo en el mes de junio, que es cuando inician de nuevo las lluvias de verano; durante este período de lluvias de junio a octubre, los volúmenes de escurrimiento de ingreso al vaso de la presa es mayor que los compromisos aguas abajo, lo que permite recuperar los almacenamientos en las presas.

En años con sequía (2011, 2012 y 2013), los niveles de almacenamiento en la presa al mes de junio se encuentran al nivel de emergencia con valores de  $I_e$  menores a 0,15 (MMAE, 2005; Ortega, 2016), el mínimo histórico ocurrió en junio de 2012 cuando el almacenamiento en la presa fue menor al 3% de su capacidad total (Ravelo *et al.*, 2014); en cambio en años normales (2014) y húmedos (2015), si bien el nivel de almacenamiento se encuentra en fase de emergencia los valores de  $I_e$  son mayores a 0,1. Así mismo, en dichos años secos los niveles máximos de almacenamiento al mes de octubre se encuentran en prealerta, con valores de  $I_e$  entre 0,30 y 0,50; en cambio en los años normales o húmedos los niveles de almacenamiento se encuentran en fase estable o de normalidad, con valores de  $I_e$  mayores a 0,50; el mayor valor de  $I_e$  en la presa Sanalona ocurrió en el mes de noviembre de 2015, con valores de  $I_e$  cercano a 0,70, debido a que este fue un año húmedo, con lluvias importantes en el mes de octubre.

En la Figura 3.57b, se observa que el comportamiento de los volúmenes almacenados en la presa El Varejonal presenta un comportamiento diferente al de la presa Sanalona, si

bien presenta ciclos de descarga por atender compromisos del Plan de Riego del DR010 y recuperación de almacenamientos por las lluvias de verano; los ciclos de siembras 2011-2012 y 2012-2013 iniciaron en fase de alerta, con valores de  $I_e$  entre 0,15 y 0,30, debido a las sequías meteorológicas e hidrológicas extremas que ocurrieron en este período; así mismo el valor más pequeño de  $I_e$  se presentó en junio de 2012, cuando las presas llegaron a su nivel mínimo histórico de almacenamiento, El Varejonal alcanzo un almacenamiento menor al 5% de su capacidad total (Ravelo *et al.*, 2014); También se observa que el ciclo 2012-2013 inicio en el mes de octubre en fase de alerta y junio del siguiente año alcanzo la fase de emergencia, la llegada del huracán Manuel en septiembre de 2013 permitió la recuperación de almacenamiento en el vaso, hasta llegar a la fase de prealerta en octubre con la que se inició el siguiente ciclo agrícola.

En el ciclo agrícola 2013-2014, al inicio de la temporada de lluvias, en junio de 2014, los almacenamientos de la presa El Varejonal se encontraba en fase de alerta, y al final de este ciclo los almacenamientos alcanzaron la fase de estabilidad o de normalidad; por lo que el ciclo agrícola 2014-2015 inicio en fase de normalidad hídrica en octubre de 2014, disminuye a fase de prealerta en junio de 2015 y concluye en septiembre en fase de normalidad, en el cierre del año 2015 los almacenamientos se encontraron en fase de estabilidad; este comportamiento se debió a que la temporada de lluvias de 2014 y 2015 fueron abundantes, considerando al año 2014 como de normalidad hídrica y al 2015 como húmedo, debido al desarrollo del Monzón Mexicano por efectos del fenómeno El Niño (SMN, 2016).

Tabla 3.19: Evaluación del pronóstico del SDI mensual en las presas El Varejonal y Sanalona, estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas vs los valores observados, para el período 2011-2015, utilizando los criterios: R2, MAE, MRSE, d y %MRSE (CDE), (n=60).

Proyecciones IE de Presas									
Fecha	Presa El Varejonal		Presa Sanalona		Fecha	Presa El Varejonal		Presa Sanalona	
	Observado	Proyección	Observado	Proyección		Observado	Proyección	Observado	Proyección
ene-11	0.45	0.45	0.18	0.17	oct-13	0.47	0.48	0.39	0.61
feb-11	0.43	0.43	0.16	0.15	nov-13	0.48	0.50	0.57	0.59
mar-11	0.38	0.38	0.14	0.11	dic-13	0.44	0.44	0.34	0.44
abr-11	0.33	0.31	0.12	0.12	ene-14	0.43	0.43	0.33	0.30
may-11	0.26	0.28	0.08	0.12	feb-14	0.41	0.42	0.28	0.28
jun-11	0.17	0.25	0.06	0.11	mar-14	0.35	0.36	0.21	0.24
jul-11	0.20	0.27	0.34	0.38	abr-14	0.27	0.31	0.14	0.17
ago-11	0.27	0.27	0.39	0.43	may-14	0.21	0.26	0.10	0.13
sep-11	0.26	0.23	0.33	0.37	jun-14	0.20	0.23	0.16	0.16
oct-11	0.24	0.24	0.17	0.19	jul-14	0.29	0.29	0.39	0.40
nov-11	0.19	0.21	0.16	0.16	ago-14	0.37	0.39	0.46	0.49
dic-11	0.15	0.15	0.13	0.14	sep-14	0.51	0.48	0.57	0.58
ene-12	0.12	0.12	0.10	0.09	oct-14	0.54	0.50	0.47	0.54
feb-12	0.10	0.11	0.09	0.08	nov-14	0.49	0.48	0.34	0.30
mar-12	0.08	0.10	0.07	0.07	dic-14	0.47	0.46	0.26	0.27
abr-12	0.04	0.07	0.04	0.06	ene-15	0.44	0.44	0.24	0.25
may-12	0.01	0.05	0.02	0.06	feb-15	0.47	0.47	0.23	0.29
jun-12	0.01	0.03	0.01	0.05	mar-15	0.44	0.43	0.19	0.19
jul-12	0.10	0.11	0.32	0.35	abr-15	0.37	0.39	0.13	0.12
ago-12	0.18	0.20	0.45	0.44	may-15	0.30	0.34	0.07	0.12
sep-12	0.29	0.27	0.51	0.48	jun-15	0.31	0.32	0.21	0.18
oct-12	0.29	0.27	0.30	0.34	jul-15	0.40	0.40	0.49	0.44
nov-12	0.26	0.25	0.25	0.25	ago-15	0.52	0.53	0.59	0.58
dic-12	0.24	0.23	0.24	0.28	sep-15	0.57	0.60	0.60	0.61
ene-13	0.21	0.21	0.22	0.21	oct-15	0.60	0.59	0.63	0.64
feb-13	0.19	0.20	0.16	0.19	nov-15	0.54	0.53	0.43	0.58
mar-13	0.16	0.19	0.10	0.13	dic-15	0.53	0.52	0.40	0.47
abr-13	0.10	0.16	0.06	0.08					
may-13	0.06	0.11	0.04	0.07					
jun-13	0.04	0.07	0.03	0.06					
jul-13	0.10	0.13	0.27	0.19					
ago-13	0.21	0.13	0.40	0.36					
sep-13	0.34	0.26	0.64	0.62					
						R <sup>2</sup>	0.9710	R <sup>2</sup>	0.9374
						d	0.9911	d	0.9809
						MAE	0.0210	MAE	0.0322
						RMSE	0.0288	RMSE	0.0481
						%RMSE	9.6638	%RMSE	18.2750

## **VULNERABILIDAD A LAS SEQUÍAS METEOROLÓGICAS EN EL OCPN**

Los resultados del monitoreo mensual de sequías meteorológicas mediante los índices SPI y PDSI sirven de insumo para que con base en la metodología descrita en la sección Estimación de la vulnerabilidad a la sequía, se determine la vulnerabilidad a la sequía por Consejos de Cuenca, cuenca y municipios. Así mismo, los resultados del pronóstico mensual de sequías meteorológicas mediante el índice PDSI servirá de insumo para determinar la vulnerabilidad potencial a la sequía meteorológica de los tres meses siguientes por Consejos de Cuenca, cuenca y municipios que integran a la RHA3 PN, que es un poco diferente al OCPN, ya que la primera comprende a la integración de municipios que atiende y la segunda establece su delimitación a los parteaguas de las cuencas que lo conforman.

Una vez determinada la vulnerabilidad meteorológica presente y futura, mediante combinaciones de la vulnerabilidad con la amenaza se podrá estimar el riesgo a la que podrá estar expuesta la población en los municipios, cuencas y Consejos de cuenca de la RHA3 PN, ante la ocurrencia de sequías meteorológicas, de forma similar a los estimados por Ravelo (2012) y Torrecillas *et al.* (2013).

Los resultados de la estimación de la vulnerabilidad ante la sequía en el OCPN, se muestran en la Tabla 3.20 y los mapas de índices de vulnerabilidad económica, social, ambiental y global en las Figuras 3.58 a, b, c y d a escalas de Consejo de Cuenca, Cuencas y municipios; asimismo, se compara con los resultados obtenidos para los años 2015 (Torrecillas *et al.*, 2015), Figuras 3.59, y 2016 (CONAGUA, 2017), Tabla 3.21.

Para la estimación se utilizó el programa índices de vulnerabilidad RHA3.xlsx y Municipios RHA3.mxd, proporcionados en los cursos de preparación en la estimación de la vulnerabilidad por municipios que integran los Consejos y Organismo de Cuenca

(CONAGUA, 2015), los cuales quedan como una herramienta para determinar la vulnerabilidad a la sequía en diferentes escenarios futuros, de los siguientes tres meses.

Tabla 3.20: Evaluación de la vulnerabilidad a la sequía por municipios en el OCPN, 2016.

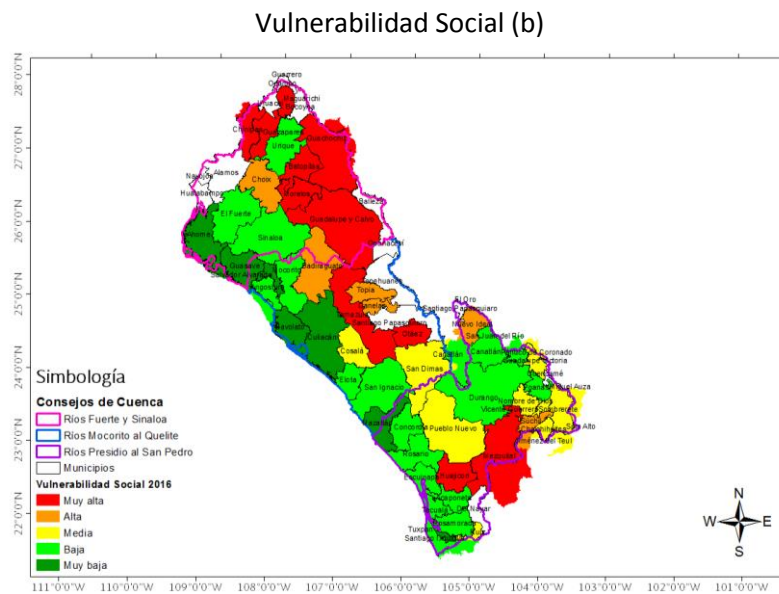
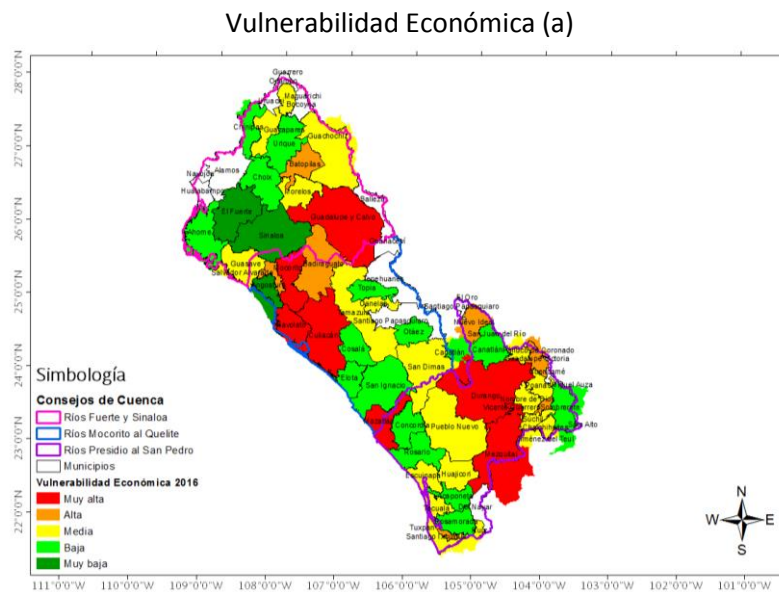
Vulnerabilidad 2016:		Económica		Social		Ambiental		Global	
Municipio	Estado	(%)	Escala	(%)	Escala	(%)	Escala	(%)	Escala
Mazatlán	Sinaloa	95,685	Muy alta	9,1675	Muy baja	93,863	Muy alta	66,557	Alta
Sinaloa	Sinaloa	13,598	Muy baja	37,7387	Baja	79,871	Alta	39,08	Baja
Culiacán	Sinaloa	88,618	Muy alta	1,624	Muy baja	22,678	Baja	9,4325	Muy baja
Navolato	Sinaloa	89,699	Muy alta	16,5167	Muy baja	36,957	Baja	34,818	Baja
San Ignacio	Sinaloa	26,443	Baja	36,3963	Baja	82,272	Muy alta	46,288	Media
Salvador Alvarado	Sinaloa	70,504	Alta	15,1288	Muy baja	45,639	Media	26,972	Baja
Rosario	Sinaloa	32,333	Baja	32,4477	Baja	83,129	Muy alta	46,328	Media
Mocorito	Sinaloa	86,772	Muy alta	38,4372	Baja	45,077	Media	54,734	Media
Guasave	Sinaloa	48,786	Media	14,2711	Muy baja	50,695	Media	21,135	Baja
El Fuerte	Sinaloa	0,0011	Muy baja	32,5743	Baja	12,312	Muy baja	0,8973	Muy baja
Escuinapa	Sinaloa	49,666	Media	30,3767	Baja	39,536	Baja	29,602	Baja
Elota	Sinaloa	34,423	Baja	35,0556	Baja	58,422	Media	35,574	Baja
Choix	Sinaloa	20,333	Baja	64,4153	Alta	35,001	Baja	40,948	Media
Cosalá	Sinaloa	25,755	Baja	42,1685	Media	80,415	Muy alta	49,045	Media
Concordia	Sinaloa	28,629	Baja	28,9737	Baja	83,91	Muy alta	42,614	Media
Badiraguato	Sinaloa	63,031	Alta	64,46	Alta	13,81	Muy baja	46,014	Media
Ahome	Sinaloa	29,25	Baja	6,4613	Muy baja	45,074	Media	8,6399	Muy baja
Angostura	Sinaloa	14,312	Muy baja	20,0271	Baja	39,369	Baja	12,047	Muy baja
Acaponeta	Nayarit	38,853	Baja	26,5058	Baja	34,565	Baja	21,673	Baja
Huajicori	Nayarit	46,849	Media	83,2383	Muy alta	0,2199	Muy baja	32,345	Baja
Ruíz	Nayarit	55,42	Media	49,8167	Media	32,92	Baja	42,715	Media
Tecuala	Nayarit	45,657	Media	25,6577	Baja	36,97	Baja	24,007	Baja
Tuxpan	Nayarit	75,341	Alta	10,9792	Muy baja	43,87	Media	23,993	Baja
Santiago Ixcuintla	Nayarit	51,097	Media	26,3897	Baja	63,684	Alta	37,342	Baja
Rosamorada	Nayarit	33,899	Baja	33,1582	Baja	41,159	Media	26,959	Baja
Tamazula	Durango	45,641	Media	84,5542	Muy alta	54,439	Media	77,364	Alta
Topía	Durango	32,334	Baja	72,8304	Alta	81,364	Muy alta	74,684	Alta
Vicente Guerrero	Durango	70,1	Alta	49,25	Media	2,8193	Muy baja	25,571	Baja
Nuevo Ideal	Durango	62,5	Alta	60,9118	Alta	46,971	Media	60,241	Alta
Súchil	Durango	44,739	Media	78,2204	Alta	25,264	Baja	58,756	Media
Canatlán	Durango	25,975	Baja	35,2258	Baja	31,365	Baja	21,844	Baja
Canelas	Durango	42,129	Media	74,6204	Alta	74,536	Alta	75,6	Alta
Durango	Durango	99,996	Muy alta	33,9259	Baja	99,999	Muy alta	99,906	Muy alta
Guadalupe Victoria	Durango	68,014	Alta	45,8275	Media	65,308	Alta	59,587	Media
Mezquital	Durango	92,593	Muy alta	99,8406	Muy alta	81,385	Muy alta	99,89	Muy alta
Nombre de Dios	Durango	54,798	Media	43,6346	Media	49,344	Media	45,403	Media
Otáez	Durango	26,179	Baja	83,5918	Muy alta	32,371	Baja	61,107	Alta
Pánuco de Coronado	Durango	44,686	Media	36,2003	Baja	42,672	Media	33,367	Baja
Poanas	Durango	53,792	Media	38,3897	Baja	46,752	Media	39,976	Baja
Pueblo Nuevo	Durango	40,453	Media	44,0042	Media	36,595	Baja	34,767	Baja
San Dimas	Durango	44,114	Media	59,016	Media	29,592	Baja	43,844	Media
Chínipas	Chihuahua	36,557	Baja	84,2132	Muy alta	38,309	Baja	68,313	Alta
Guazapares	Chihuahua	50,506	Media	82,1094	Muy alta	32,238	Baja	68,1	Alta
Maguarichi	Chihuahua	52,451	Media	91,8024	Muy alta	74,988	Alta	91,106	Muy alta
Urique	Chihuahua	33,653	Baja	29,409	Baja	41,532	Media	24,523	Baja
Guadalupe y Calvo	Chihuahua	85,68	Muy alta	95,5681	Muy alta	69,631	Alta	96,954	Muy alta
Morelos	Chihuahua	46,154	Media	81,2793	Muy alta	50,119	Media	72,857	Alta
Batopilas	Chihuahua	66,535	Alta	99,7144	Muy alta	32,666	Baja	97,661	Muy alta
Guachochí	Chihuahua	44,653	Media	89,2743	Muy alta	22,161	Baja	70,401	Alta
Sombrete	Zacatecas	38,655	Baja	46,395	Media	92,887	Muy alta	68,158	Alta
Chalchihuites	Zacatecas	46,574	Media	49,2118	Media	35,953	Baja	40,427	Media
<b>Clasificación de Vulnerabilidad a la Sequía (Método IMTA, 2015)</b>									
<b>Muy Baja</b>		<b>Baja</b>		<b>Media</b>		<b>Alta</b>		<b>Muy Alta</b>	
0 - 20 %		21 - 40 %		41 - 60 %		61 - 80 %		81 - 100 %	

Tabla 3.21: Evaluación de la vulnerabilidad a la sequía por municipios en la RHA3 PN, mediante metodología propuesta por CONAGUA, para los años 2015 y 2016.

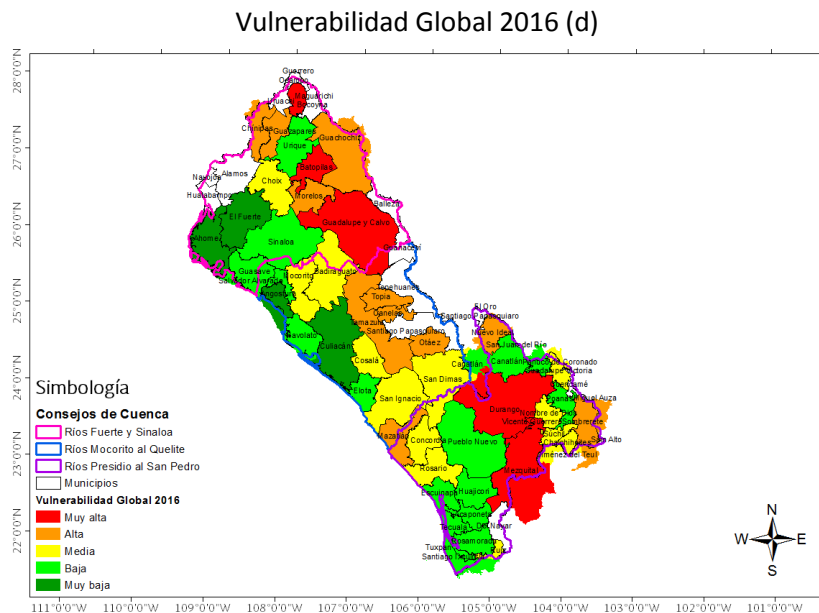
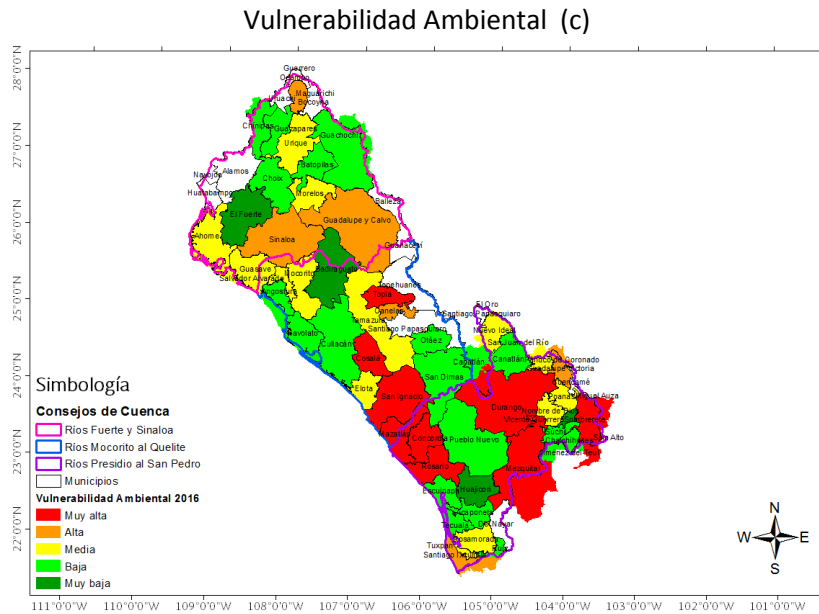
Vulnerabilidad Global 2016				2015
Municipio	Estado	(%)	Escala	Escala
Mazatlán	Sinaloa	66,5571	Alta	Alta
Sinaloa	Sinaloa	39,0804	Baja	Media
Culiacán	Sinaloa	9,4325	Muy baja	Media
Navolato	Sinaloa	34,8183	Baja	Media
San Ignacio	Sinaloa	46,2876	Media	Media
Salvador Alvarado	Sinaloa	26,9715	Baja	Baja
Rosario	Sinaloa	46,3277	Media	Baja
Mocorito	Sinaloa	54,7342	Media	Baja
Guasave	Sinaloa	21,1347	Baja	Baja
El Fuerte	Sinaloa	0,8973	Muy baja	Muy baja
Escuinapa	Sinaloa	29,6017	Baja	Baja
Eyota	Sinaloa	35,5742	Baja	Media
Choix	Sinaloa	40,9484	Media	Alta
Cosalá	Sinaloa	49,0445	Media	Baja
Concordia	Sinaloa	42,6142	Media	Media
Badiraguato	Sinaloa	46,0144	Media	Baja
Ahome	Sinaloa	8,6399	Muy baja	Muy baja
Angostura	Sinaloa	12,0465	Muy baja	Muy baja
Acaponeta	Nayarit	21,6726	Baja	Muy baja
Huajicori	Nayarit	32,3451	Baja	Muy baja
Ruíz	Nayarit	42,7148	Media	Baja
Tecuala	Nayarit	24,0072	Baja	Muy baja
Tuxpan	Nayarit	23,9928	Baja	Baja
Santiago Ixcuintla	Nayarit	37,3419	Baja	Muy baja
Rosamorada	Nayarit	26,9587	Baja	Muy baja
Tamazula	Durango	77,3643	Alta	Alta
Topia	Durango	74,684	Alta	Alta
Vicente Guerrero	Durango	25,5708	Baja	Baja
Nuevo Ideal	Durango	60,241	Alta	Muy alta
Súchil	Durango	58,7559	Media	Baja
Canatlán	Durango	21,8437	Baja	Muy baja
Canelas	Durango	75,5998	Alta	Muy alta
Durango	Durango	99,9058	Muy alta	Muy alta
Guadalupe Victoria	Durango	59,5871	Media	Media
Mezquital	Durango	99,8904	Muy alta	Muy alta
Nombre de Dios	Durango	45,4033	Media	Baja
Otáez	Durango	61,1073	Alta	Media
Pánuco de Coronado	Durango	33,3665	Baja	Baja
Poanas	Durango	39,9761	Baja	Baja
Pueblo Nuevo	Durango	34,7667	Baja	Baja
San Dimas	Durango	43,8436	Media	Media
Chinipas	Chihuahua	68,313	Alta	Alta
Guazapares	Chihuahua	68,1002	Alta	Alta
Maguarichi	Chihuahua	91,1055	Muy alta	Muy alta
Urique	Chihuahua	24,5233	Baja	Alta
Guadalupe y Calvo	Chihuahua	96,9542	Muy alta	Muy alta
Morelos	Chihuahua	72,8572	Alta	Alta
Batopilas	Chihuahua	97,6605	Muy alta	Muy alta
Guachochi	Chihuahua	70,4014	Alta	Alta
Sombrerete	Zacatecas	68,1583	Alta	Alta
Chalchihuites	Zacatecas	40,4271	Media	Media
Clasificación de Vulnerabilidad a la Sequía (Método IMTA, 2015)				
Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
0 - 20 %	21 - 40 %	41 - 60 %	61 - 80 %	81 - 100 %

## VULNERABILIDAD A LAS SEQUÍAS POR CONSEJO DE CUENCA

El Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN) está conformado por cuencas y la Región Hidrológica Administrativa (RHA3 PN), por una integración de municipios (CONAGUA, 2013) y están conformados por los Consejos de Cuenca de los Ríos Fuerte y Sinaloa (línea rosa), Ríos del Mocorito al Quélite (línea azul) y Ríos del Presidio al San Pedro (línea magenta).



Figuras 3.58: Mapas de vulnerabilidad Económica (a), Social (b), Ambiental (c) y global (d) de la RHA3PN. Año 2016.



Figuras 3.58, Continuación: Mapas de vulnerabilidad Económica (a), Social (b), Ambiental (c) y global (d) de la RHA3PN. Año 2016.

En la Figura 3.58, se aprecian los grados de vulnerabilidad en los Consejos de cuenca que conforman la RHA3PN, como ejemplo, las vulnerabilidades muy altas en lo económico en el consejo de CCRFS corresponden al municipio de Guadalupe y Calvo; en lo social en el CCRMQ corresponden a los municipios de Tamazula y Otáez; en lo ambiental en el CCRPSP corresponden a los municipios Mazatlán, Concordia, Rosario, Durango, Mezquital y Sombrerete; y en los global en los municipios de Maguarichi,



Batopilas y Guadalupe y Calvo en el CCRFS, Durango y Mezquital en el CCRPSP; y en el CCRMQ no se tienen municipios con vulnerabilidad extrema, solo vulnerabilidad alta en los municipios Topia, Tamazula y Otáez; en contraparte, se tiene vulnerabilidad global muy baja en los municipios El Fuerte y Ahome en el CCRFS, Angostura y Culiacán en el CCRMQ; en el CCRPSP no se tienen municipios con vulnerabilidad muy baja.

Una descripción más detallada de los diferentes tipos y grados de vulnerabilidades por municipios se da en la sección siguiente.

## **VULNERABILIDAD MUNICIPAL A LAS SEQUÍAS**

Los índices de vulnerabilidad de sequía en la RHA Pacífico Norte son indicadores relativos a escala municipal que sirven para identificar y proponer acciones en los PMPMS para disminuir la vulnerabilidad tomando en cuenta los índices económicos, sociales y ambientales al igual que los factores identificados por medio de la metodología de la planeación estratégica para el desarrollo de los proyectos prioritarios en los Consejos de Cuenca y municipios (Torrecillas *et al.*, 2015).

### **Vulnerabilidad económica**

La estimación de los niveles de vulnerabilidad económica para los distintos municipios se basa en el uso de diversos indicadores de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación. A esos indicadores se les aplica distintos pesos para indicar sus efectos sobre la vulnerabilidad; aunque los pesos utilizados no revistan mayor influencia sobre los indicadores, es el valor de los indicadores el que influye sobre la vulnerabilidad final (Torrecillas *et al.*, 2015). Así por ejemplo, en la Tabla 3.20 y Figura 3.58a los municipios de Mazatlán, Culiacán, Navolato, Mocorito, Salvador Alvarado y Badiraguato, en el estado de Sinaloa; Tuxpan en el estado de Nayarit; Durango, Mezquital, Vicente Guerrero, Nuevo Ideal y Guadalupe Victoria en el estado de Durango; Guadalupe y Calvo y Batopilas en el estado de Chihuahua, poseen muy alta y alta vulnerabilidad económica debido a los valores elevados de indicadores densidad de población, población

económicamente activa desocupada y la explotación de los acuíferos. En cambio, los municipios de Guasave, Escuinapa, San Ignacio, Rosario, Elota, Choix, Cosalá, Concordia, Ahome, Sinaloa, El Fuerte y Angostura, en el estado de Sinaloa; Huajicori, Ruíz, Tecuala, Santiago Ixcuintla y Rosamorada, en el estado de Nayarit; Tamazula, Súcil, Canelas, Nombre de Dios, Pánuco de Coronado, Poanas, Pueblo Nuevo, San Dimas, Topia, Canatlán, y Otáez, en el estado de Durango; Guazapares, Maguarichi, Morelos, Guachochi, Chínipas, y Urique, en el estado de Chihuahua; y Chalchihuites y Sombrerete, en el estado de Zacatecas; poseen una vulnerabilidad media, baja o muy baja debido a que posee una baja densidad poblacional, una baja explotación de los acuíferos y un bajo valor ganadero y agrícola, como lo expresa Torrecillas *et al.* (2015).

### **Vulnerabilidad Social**

En la Tabla 3.20 y Figura 3.58b, se observa que los municipios con muy alta y alta vulnerabilidad Social son Choix y Badiraguato en el estado Sinaloa; Huajicori en el estado de Nayarit; Tamazula, Mezquitlan, Otáez, Topia, Nuevo Ideal, Súcil y Canelas en el estado de Durango; Chínipas, Guazapares, Maguarichi, Guadalupe y Calvo, Morelos, Batopilas y Guachochi en el estado de Chihuahua cuyos indicadores de mayor influencia en la vulnerabilidad alta son: Población en condiciones de pobreza, ingreso per cápita y beneficiarios del programa LICONSA. Por otro lado, los municipios con media, baja y muy baja vulnerabilidad son Cosalá, Sinaloa, San Ignacio, Rosario, Mocorito, El Fuerte, Escuinapa, Elota, Concordia, Angostura, Mazatlán, Culiacán, Navelato, Salvador Alvarado, Guasave y Ahome en el estado de Sinaloa; Ruíz, Acaponeta, Tecuala, Santiago Ixcuintla, Rosamorada y Tuxpan en el estado de Nayarit, Vicente Guerrero, Guadalupe Victoria, Nombre de Dios, Pueblo Nuevo, San Dimas, Canatlán, Durango, Panuco de Coronado y Poanas en el estado de Durango; Urique en el estado de Chihuahua; Sombrerete y Chalchihuites en Zacatecas donde se registran los valores más bajos de porcentaje de la población en condiciones de pobreza, bajo porcentaje de viviendas sin agua entubada. No es significativo el efecto de los beneficiarios del programa LINCOSA ni los ingresos per cápita, coincidiendo con Torrecillas *et al.* (2015).

## **Vulnerabilidad Ambiental**

Los indicadores de vulnerabilidad ambiental que tienen mayor efecto son: El grado de explotación de los acuíferos, ambiental y la deforestación con sus respectivos pesos. En la Tabla 3.20 y Figura 3.58c, se muestran los municipios con vulnerabilidad muy alta y alta destacando Mazatlán, San Ignacio, Rosario, Cosalá, Concordia y Sinaloa en el estado de Sinaloa; Santiago Ixcuintla en el estado de Nayarit; Topia, Durango, Mezquital, Canelas y Guadalupe Victoria en el estado Durango; Maguarichi y Guadalupe y Calvo en el estado de Chihuahua; y Sombrerete en el estado de Zacatecas. Así mismo, en lo referente a los niveles de la vulnerabilidad media, baja y muy baja destacan los municipios: Salvador Alvarado, Rosario, Mocerito, Guasave, Elota, Ahome, Culiacán, Navolato, Escuinapa, Choix, Angostura, El Fuerte y Badiraguato en el estado de Sinaloa; Tuxpan, Rosamorada, Acaponeta, Ruiz, Tecuala y Huajicori en el estado de Nayarit; Tamazula, Nuevo Ideal, Nombre de Dios, Pánuco de Coronado, Poanas y Vicente Guerrero en el estado de Durango; Urique, Morelos, Chínipas, Guazapares, Batopilas y Guachochi en el estado de Chihuahua; y Chalchihuites en el estado de Zacatecas; estos municipios intermontanos destacan en su baja vulnerabilidad ambiental debido a los menores valores de deforestación a pesar de la considerable explotación de acuíferos. Así mismo, el Índice de la calidad del agua (ICA) en el agua superficial y subterránea es de mala calidad en muchos municipios lo que influye en tener menos disponibilidad de agua dulce; aun sin embargo, no se considera en los indicadores para evaluar los índices de Vulnerabilidad ambiental, más por su importancia en la reducción de las disponibilidad de aguas nacionales debiera ser un indicador esencial.

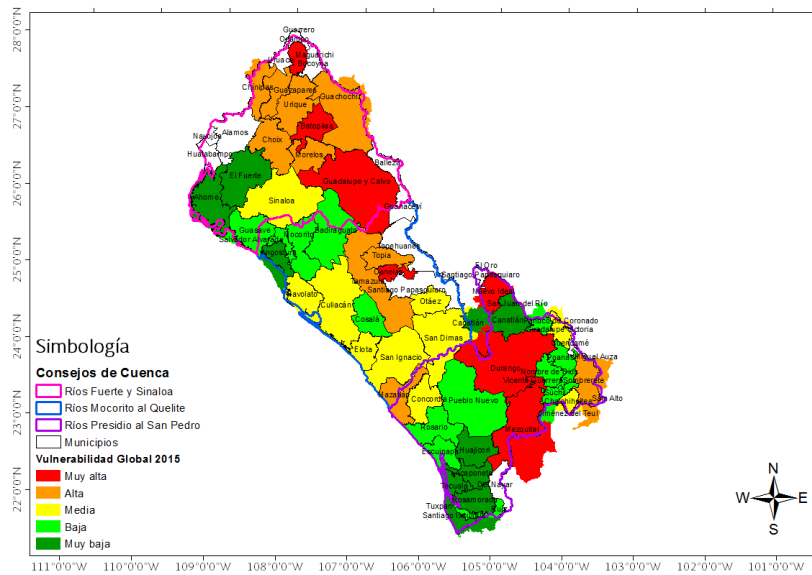
## **Vulnerabilidad Global**

La vulnerabilidad global ha sido determinada como resultado del producto equivalente de las vulnerabilidades económica, social y ambiental ver Tabla 3.20 y Figura 3.58d. La vulnerabilidades globales muy altas corresponden a los municipios de Durango y Mezquital en el estado de Durango; Maguarichi Guadalupe y Calvo y Batopilas en el estado de Chihuahua; vulnerabilidades altas a los municipios de Mazatlán en Sinaloa; Tamazula, Topia Nuevo Ideal, Canelas y Otáez en el estado de Durango; Chínipas,

Guazapares, Morelos y Guachochi en el estado de Chihuahua; y Sombrerete en el estado de Zacatecas. Por otra parte, las vulnerabilidades medias corresponden a los municipios de San Ignacio, Rosario, Mocrito, Choix, Cosalá, Concordia y Badiraguato en el estado de Sinaloa; Ruiz en el estado de Nayarit; Súcil, Guadalupe Victoria, Nombre de Dios y San Dimas en el estado de Durango y Chalchihuites en el estado de Zacatecas; las vulnerabilidades bajas corresponden a los municipios de Sinaloa, Culiacán, Salvador Alvarado, Guasave, Escuinapa y Elota en el estado de Sinaloa; Acaponeta, Huajicori, Tecuala, Tuxpan, Santiago Ixcuintla y Rosamorada en el estado de Nayarit; Vicente Guerrero, Canatlán, Pánuco de Coronado, Poanas y Pueblo Nuevo en el estado de Durango; y Urique en el estado de Chihuahua. Finalmente, las vulnerabilidades ambientales muy bajas fueron pocas, que correspondieron a los municipios de Culiacán, El Fuerte, Ahome y Angostura en el estado de Sinaloa.

Los resultados de comparar las vulnerabilidades globales estimadas con la misma metodología para los años 2015 (Figura 3.58) y 2016 (Figura 3.59 d), Tabla 3.21; considerando modificaciones en algunos parámetros que intervienen en las vulnerabilidades económicas y sociales producto de la actualización de la información al 2016, (Ver Anexo 7) se encontró que algunos municipios cambiaron de grado de vulnerabilidad; por ejemplo, el municipio de Sinaloa pasó de vulnerabilidad global media en 2015 a vulnerabilidad global baja en 2016; el municipio de Culiacán pasó de vulnerabilidad global media a muy baja, el municipio de Navolato de media a baja, El Rosario subió de baja a media, Mocrito de baja a media, Elota de media a baja, Choix de alta a media, Cosalá de baja a media, Badiraguato de baja a media, Acaponeta de muy baja a baja, Huajicori de muy baja a baja, Ruíz de baja a media, Tecuala de muy baja a baja, Santiago Ixcuintla de muy baja a baja, Rosamorada de muy baja a baja, Nuevo ideal de muy alta a alta, Súcil de baja a media, Canatlán de muy baja a baja, Canelas de muy alta a alta, Nombre de Dios de baja a media, Otáez de media a alta, Urique de alta a media, para un total de 22 municipios que cambiaron de grado de vulnerabilidad.

### Vulnerabilidad Global 2015



Figuras 3.59: Mapa de vulnerabilidad global de la RHA3PN. Año 2015.

Como se puede apreciar el sistema de evaluación de la vulnerabilidad económica, social, ambiental y global posee áreas de fortalezas y otras de debilidades que deben ser mejoradas. El marco conceptual para determinar la vulnerabilidad es aceptable; sin embargo, existen importantes aspectos que deben ser revisados, como lo expresan (Torrecillas *et al.*, 2015), en cuanto a indicadores de vulnerabilidad, los pesos utilizados, la aplicación de una distribución probabilística y la obtención de la vulnerabilidad global.

## DETERMINACIÓN DE ESCENARIOS POR SEQUÍAS EN EL SISTEMA HÍDRICO RÍO CULIACÁN (SHRC)

En esta sección se muestran los escenarios por sequía en el Sistema Hídrico Río Culiacán (SHRC), para los primeros meses del año 2016, determinados mediante los pasos propuestos en la sección anterior.

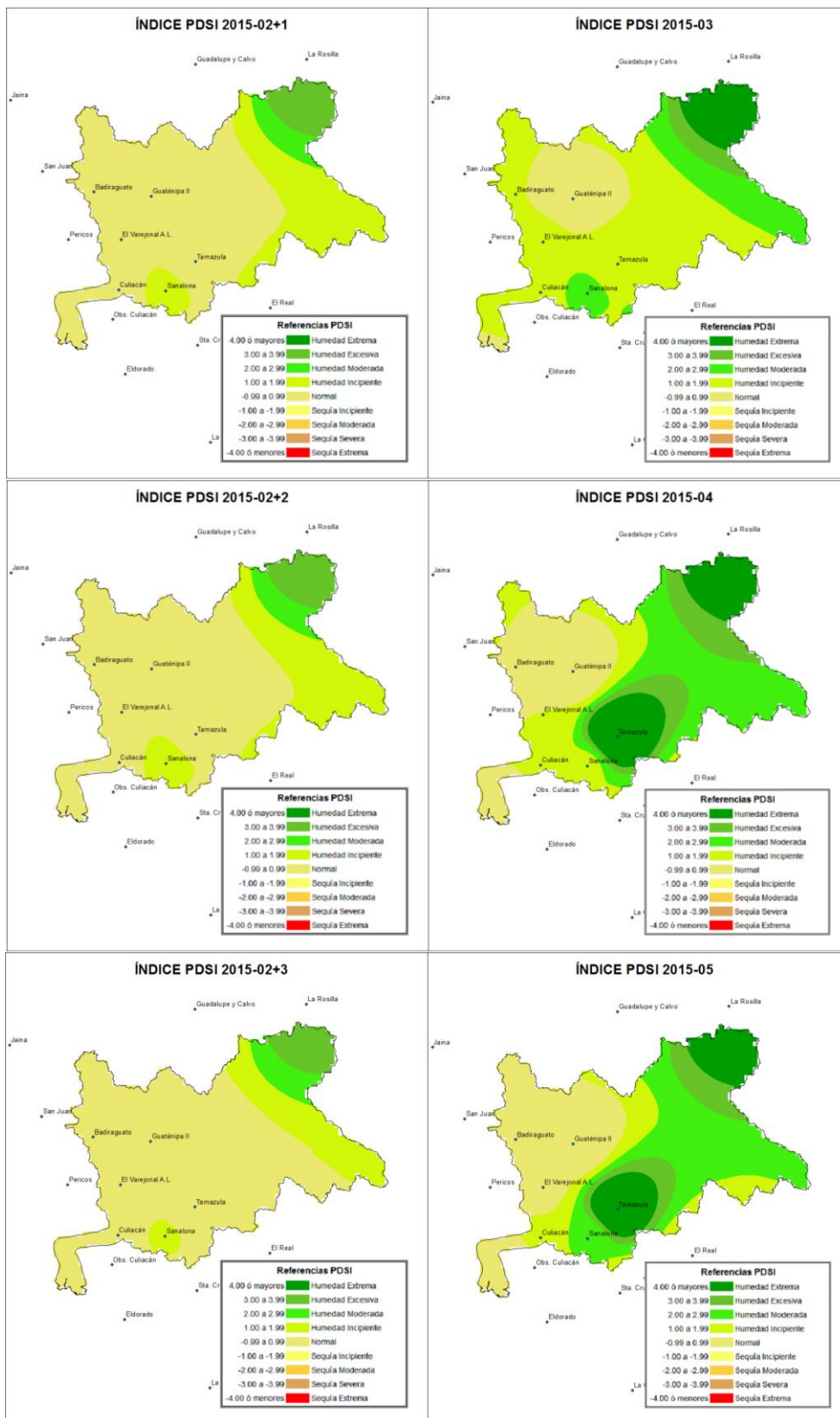
La delimitación, descripción y el modelo conceptual del funcionamiento de Sistema Hídrico del Río Culiacán ante la sequía, al igual que los puntos resultados y discusión del monitoreo temporal y espacial de la sequía meteorológica al año 2015, monitoreo de la

sequía hidrológica al año 2015, pronóstico temporal y espacial de las sequías meteorológicas al año 2015, pronóstico temporal de sequías hidrológicas al año 2015, y los de los índices de vulnerabilidad al año 2015, fueron tratados en secciones anteriores. Finalmente, los resultados de la determinación de escenarios de sequía en diferentes condiciones de clima para el SHRC se presenta a continuación:

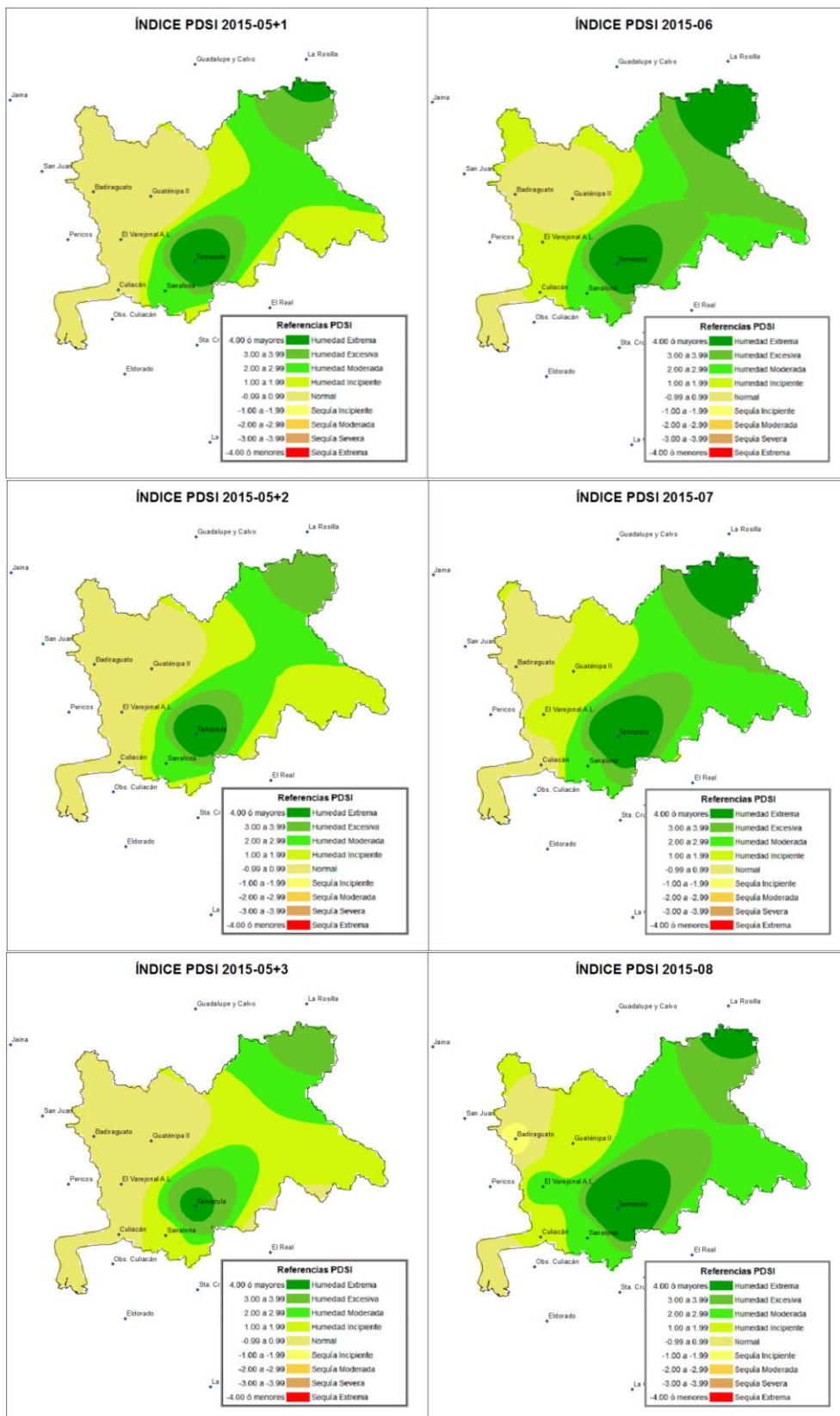
## **DETERMINACIÓN DE ESCENARIOS POR SEQUÍAS METEOROLÓGICAS EN EL SHRC.**

Los resultados del pronóstico de sequías meteorológicas temporales y espaciales a 1, 2 y 3 meses para el SHRC en la cuenca del Río Culiacán se presentan en la Tabla 3.22 y Figuras 3.60, 3.61, 3.62 y 3.63, correspondientes al período de enero 2015 a marzo 2016.

En todos los casos del año 2015, considerado año lluvioso, los valores observados superaron a los pronosticados; además, el pronóstico a un mes fue superior al pronóstico a dos y tres meses; conforme se pronostica a un mayor plazo la certidumbre del pronóstico decrece, por ello el pronóstico menos certero fue el pronóstico a tres meses. Los mejores pronósticos se dieron de enero a junio, que incluye las lluvias de invierno, el estiaje y el inicio de las lluvias de verano; en los meses lluviosos los diferenciales entre los valores de PDSI pronosticados y los estimados fueron mayores, principalmente en los meses de agosto y septiembre. A inicios del año 2016, la certidumbre del pronóstico a un mes mejoro, tanto temporal como espacialmente, siendo mayores los valores pronosticados a los observados; en donde se estimó que habría humedad de incipiente a moderada en la realidad se presentó normalidad hídrica y en donde se pronosticó humedad excesiva y extrema en la realidad fueron mayores.

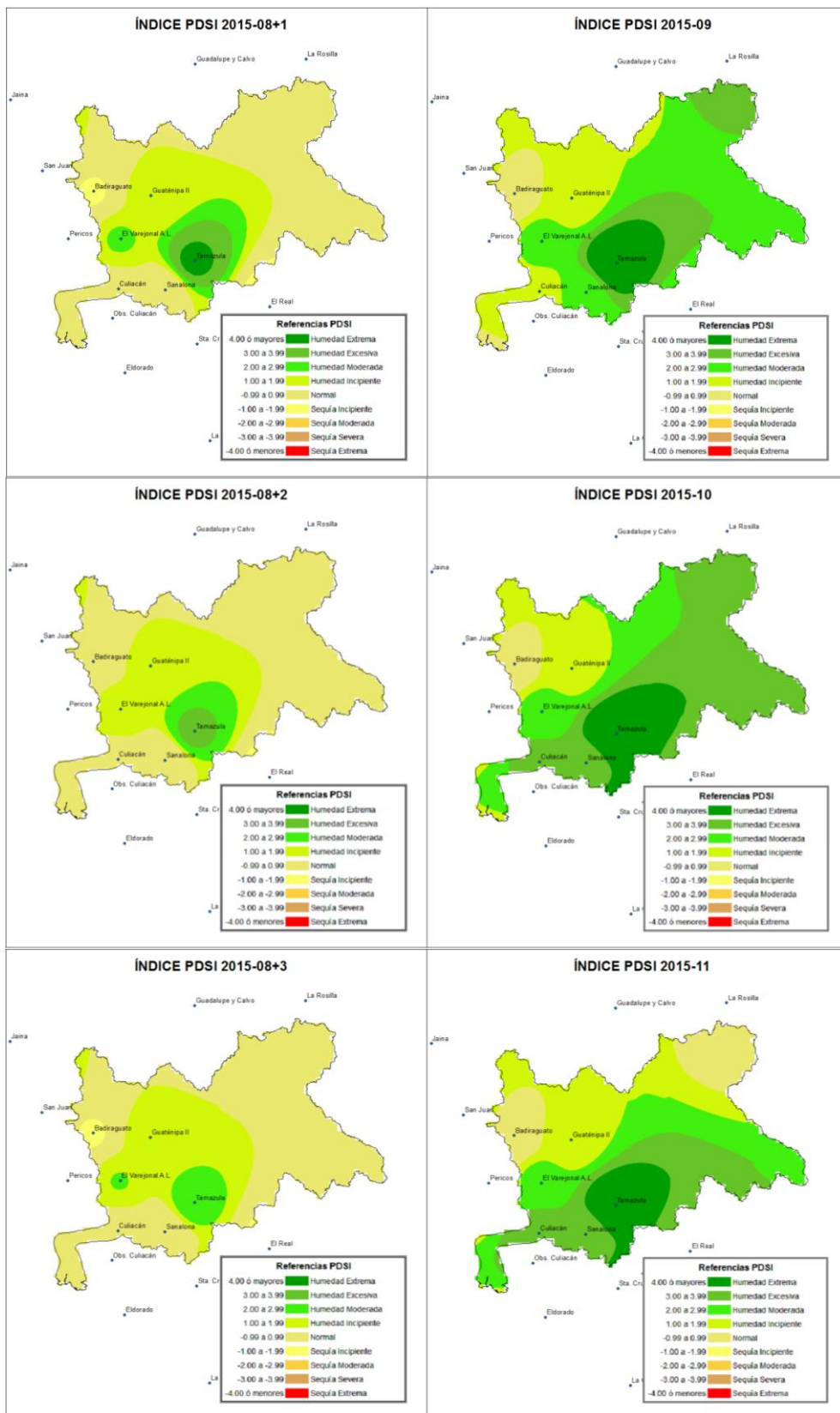


Figuras 3.60: Mapas de PDSI estimados vs pronosticados en el SHRC para los meses marzo, abril y mayo del año 2015.

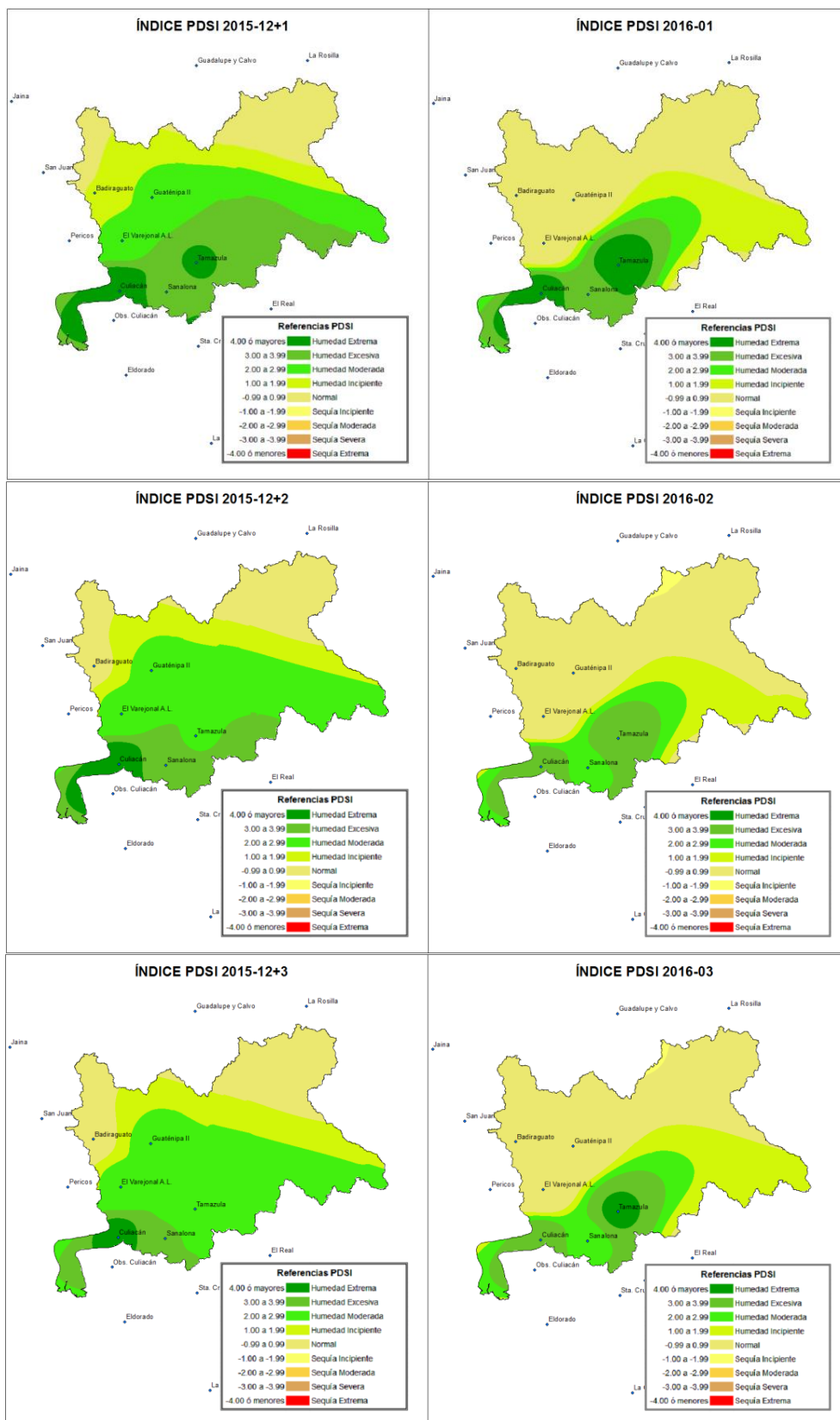


Figuras 3.61: Mapas de PDSI estimados vs pronosticados en el SHRC para los meses junio, julio y agosto del año 2015.





Figuras 3.62: Mapas de PDSI estimados vs pronosticados en el SHRC para los meses septiembre, octubre y noviembre del año 2015.



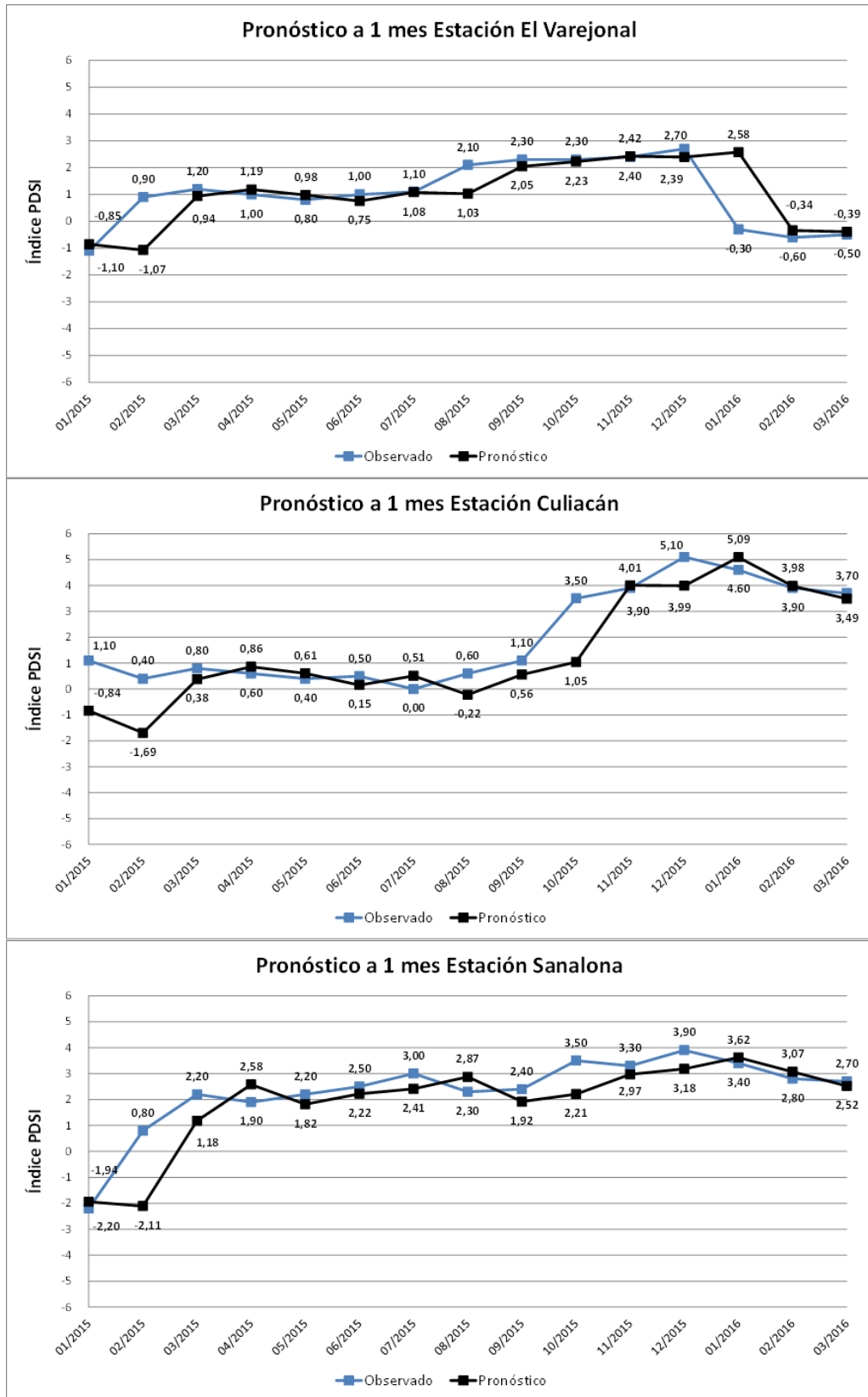
Figuras 3.63: Mapas de PDSI estimados vs pronosticados en el SHRC para los meses enero, febrero y marzo del año 2016.

Tabla 3.22: Evaluación de escenarios de sequía meteorológica mediante el índice PDSI, en las estaciones El Varejonal, Culiacán y Sanalona, estimados mediante redes neuronales vs los valores observados, para el período enero 2015 a marzo 2016, utilizando los criterios:  $R^2$ , d, MAE, MRSE y %MRSE, (n=15).

Fecha	Índice PDSI Estación El Varejonal				Índice PDSI Estación Culiacán				Índice PDSI Estación Sanalona			
	Obs.	PDSI+1	PDSI+2	PDSI+3	Obs.	PDSI+1	PDSI+2	PDSI+3	Obs.	PDSI+1	PDSI+2	PDSI+3
ene-15	-1,10	-0,85	-0,21	-0,43	1,10	-0,84	1,99	2,11	-2,20	-1,94	-1,42	-1,39
feb-15	0,90	-1,07	-0,82	-0,21	0,40	-1,69	-1,37	1,79	0,80	-2,11	-1,75	-1,32
mar-15	1,20	0,94	-1,12	-0,92	0,80	0,38	-1,83	-1,54	2,20	1,18	-1,83	-1,56
abr-15	1,00	1,19	0,90	-1,10	0,60	0,86	0,28	-1,90	1,90	2,58	1,38	-1,57
may-15	0,80	0,98	1,27	0,97	0,40	0,61	0,87	0,13	2,20	1,82	2,53	1,08
jun-15	1,00	0,75	0,96	1,29	0,50	0,15	0,46	0,71	2,50	2,22	1,68	2,57
jul-15	1,10	1,08	0,86	1,10	0,00	0,51	0,11	0,49	3,00	2,41	2,08	2,09
ago-15	2,10	1,03	1,07	0,85	0,60	-0,22	0,37	0,00	2,30	2,87	2,34	1,76
sep-15	2,30	2,05	1,05	1,06	1,10	0,56	-0,48	0,15	2,40	1,92	2,56	2,06
oct-15	2,30	2,23	2,00	1,05	3,50	1,05	0,42	-0,76	3,50	2,21	1,57	2,26
nov-15	2,40	2,42	2,24	2,01	3,90	4,01	1,07	0,38	3,30	2,97	1,99	1,29
dic-15	2,70	2,39	2,44	2,14	5,10	3,99	4,17	0,98	3,90	3,18	2,57	1,77
ene-16	-0,30	2,58	2,46	2,49	4,60	5,09	4,15	4,19	3,40	3,62	2,84	1,86
feb-16	-0,60	-0,34	2,49	2,51	3,90	3,98	4,70	3,96	2,80	3,07	3,36	2,58
mar-16	-0,50	-0,39	-0,22	2,43	3,70	3,49	3,64	4,31	2,70	2,52	2,72	3,04
CDE	$R^2$	0,4407	0,0720	0,0004	$R^2$	0,7889	0,6082	0,2616	$R^2$	0,7284	0,4655	0,4242
	d	0,8197	0,5792	0,3880	d	0,9185	0,8461	0,6912	d	0,8983	0,7552	0,6814
	MAE	0,5387	0,9940	1,3312	MAE	0,7730	1,0793	1,5155	MAE	0,6781	1,0562	1,3756
	RMSE	0,9596	1,4007	1,6694	RMSE	1,0745	1,4815	2,0714	RMSE	0,9523	1,4853	1,7610
	%RMSE	94,0813	137,3274	163,6648	%RMSE	53,3711	73,5838	102,8817	%RMSE	41,1650	64,2057	76,1218

Los resultados de la evaluación puntual del pronóstico del índice de sequía meteorológica PDSI a 1, 2 y 3 meses, mediante redes neuronales, en las localidades de El Varejonal, Culiacán y Sanalona indican que el mejor pronóstico se da para el primer mes, disminuyendo para el segundo y tercer mes; los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y el de concordancia de Willmott (d) son altos para las estaciones Culiacán y Sanalona, con valores de  $R^2$  mayores a 0,72 con d mayores a 0,89, en cambio en la estación El Varejonal se tiene un coeficiente de correlación bajo pero el coeficiente de concordancia alto ( $R^2=0,441$ ;  $d=0,820$ ), Tabla 3.22.

En la Figura 3.64, se muestran los PDSI estimados vs los pronosticados mediante redes neuronales a un mes en las estaciones El Varejonal, Culiacán y Sanalona, para el período enero 2015 a marzo 2016; se aprecia una muy buena similitud entre ambos valores a los largo de todo el período, a excepción de los meses de febrero de 2015 y enero de 2016 en la estación El Varejonal; febrero, agosto, octubre y diciembre de 2015 en la estación Culiacán y febrero, marzo, octubre y diciembre de 2015 en la estación Sanalona.



Figuras 3.64: PDSI estimados vs pronosticados a un mes para los meses enero, febrero y marzo del año 2016, en las estaciones El Varejonal, Culiacán y Sanalona que tienen influencia en el SHRC .

## **DETERMINACIÓN DE ESCENARIOS POR SEQUÍAS HIDROLÓGICAS EN EL SHRC**

En esta sección se presentan los resultados de la determinación y evaluación de escenarios por sequía hidrológica temporales para el año 2016, en las presas Sanalona y Adolfo López Mateos que conforman el SHRC en la cuenca del río Culiacán, obtenidos mediante el análisis multivariado temporal usando redes neuronales. Los escenarios considerados fueron para año seco, año normal y año húmedo, considerando condiciones similares a los años 2011, 2014 y 2015, respectivamente; además, de los escenarios considerados en el Plan de Riego del DR010 y el Estimado considerando los datos de precipitación, temperaturas media, máxima y mínima, y evaporación registrados en las estaciones climatológicas con influencia en la cuencas (río Tamazula aguas arriba de la presa Sanalona y río Humaya aguas arriba de la presa Adolfo López Mateos), así como los índices de escurrimiento mensual estimados para el año 2016.

Los indicadores considerados para la evaluación de escenarios en cada una de las presas, fueron: Los escurrimientos mensuales de ingreso a los vasos de las presas (Q), los índices de escurrimiento de sequías (SDI) y los índices de estado de las presas (Ie).

### **EVALUACIÓN DE ESCENARIOS EN LA PRESA SANALONA**

#### **Indicador Q**

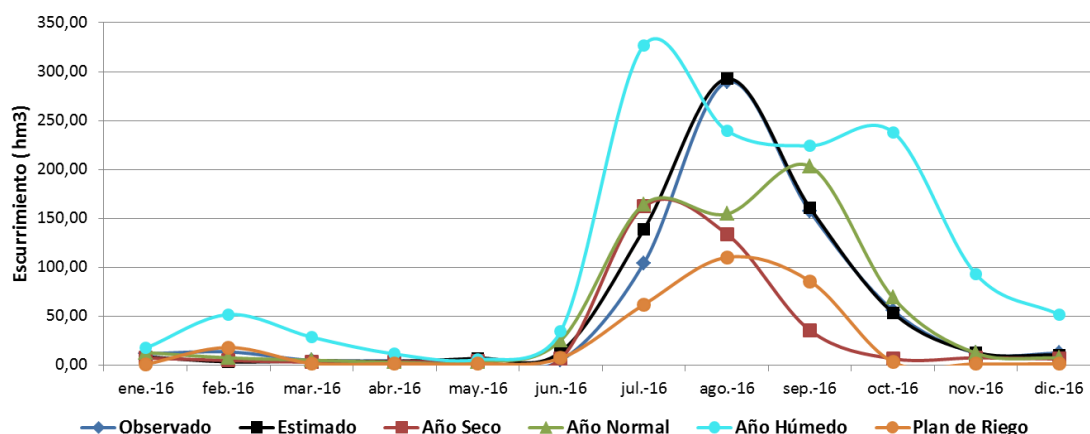
En la Tabla 3.23 y Figura 3.65, se comparan los valores de escurrimiento mensuales Q ( $\text{hm}^3$ ), determinados mediante el modelo de red Perceptron Multilayer de dos capas para diferentes escenarios de sequía hidrológica en la presa Sanalona vs los observados en el año 2016. El mejor escenario resultó ser el Estimado, cuyo coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el de concordancia de Willmott (d) son mayores al 98% ( $R^2=0,986$ ;  $d=0,996$ ), seguido del escenario año normal ( $R^2=0,711$ ;  $d=0,908$ ) y de los escenarios Plan de Riego ( $R^2=0,910$ ;  $d=0,772$ ), año seco ( $R^2=0,573$ ;  $d=0,792$ ) y húmedo ( $R^2=0,539$ ;  $d=0,766$ ); el comportamiento del escenario Estimado resultó ser muy similar a lo observado en la

realidad (Figura 3.65), cuyos diferenciales entre los valores observados y estimados fueron muy pequeños; no así los escenarios normal, seco y húmedo cuyos diferenciales de valores son más notables, principalmente el correspondiente al año húmedo. En la Figura, se aprecia que los diferenciales de valores para los primeros seis meses del año (de enero a junio) entre los observados y proporcionados por los distintos escenarios son muy pequeños, a excepción al valor del mes de febrero del año húmedo; en cambio, el diferencial entre dichos valores para los meses de lluvias de verano y temporada de ciclones tropicales (meses de julio a octubre) es muy notable, a excepción a los proporcionado por el escenario Estimado. Un caso notable es el escenario de plan de riego, ya que si bien el coeficiente de determinación es muy elevado ( $R^2=0,910$ ), el de concordancia no es tan alto ( $d=0,772$ ), esto indica que los valores estimados por la Función de Probabilidad al 98% son similares en la forma, con notables diferenciales de los valores estimados y observados para los meses de la temporada de lluvia de verano (meses de julio a octubre).

Tabla 3.23: Evaluación de escenarios de sequía hidrológica (Q) mensual en la presa Sanalona, estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas vs los valores observados, para el año 2016, utilizando los criterios:  $R^2$ , d, MAE, MRSE y %MRSE, (n=12).

Fecha	Observado	Estimado	Plan de Riego	Año Seco	Año Normal	Año Húmedo
ene-16	11,41	8,48	0,69	7,11	12,80	17,17
feb-16	13,37	3,20	17,91	4,57	7,33	51,54
mar-16	4,73	4,16	1,64	2,85	4,93	28,49
abr-16	4,30	3,80	1,38	3,40	2,72	11,23
may-16	1,89	6,89	1,03	3,80	2,90	5,44
jun-16	4,65	13,46	7,04	6,48	25,33	34,61
jul-16	103,96	138,70	61,76	162,14	164,34	326,96
ago-16	289,49	292,62	110,05	133,83	154,36	239,51
sep-16	156,99	160,79	85,70	35,33	203,07	224,20
oct-16	55,80	53,32	2,83	6,33	68,83	238,09
nov-16	12,22	12,79	1,06	7,34	12,05	92,64
dic-16	12,10	10,25	1,23	6,11	7,09	51,50
<b>CDE</b>	$R^2$	0,986456412	0,909763284	0,57302604	0,711330223	0,53896
	d	0,995893788	0,772432759	0,79154254	0,907972824	0,76576
	MAE	6,210551417	32,70421342	34,6195158	24,22463458	62,53549
	RMSE	11,01430592	59,35164446	61,2564319	45,36232838	91,74512
	%RMSE	19,70035788	106,157269	109,564201	81,13576196	164,09674

### Volumen de Escurrimiento Presa Sanalona (2016) Evaluación de Escenarios



Figuras 3.65: Escenarios de sequías hidrológicas Q (hm<sup>3</sup>) mensuales pronosticados vs observados en el la presa Sanalona, del SHRC, para los meses del año 2016.

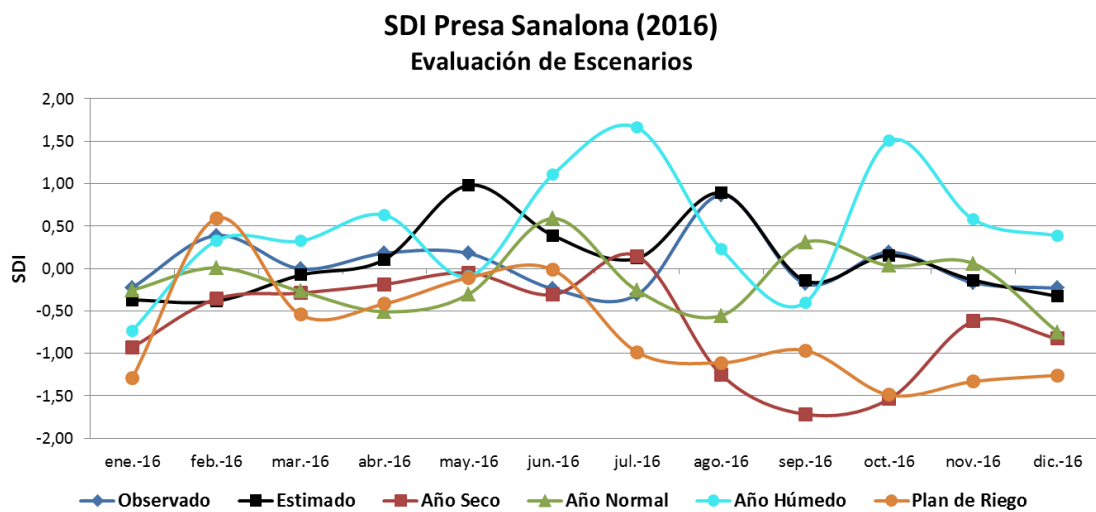
### Indicador SDI

En la Tabla 3.24 y Figura 3.66, se comparan los valores de índice de sequía de escurrimiento mensuales SDI, determinados con los valores de escurrimiento estimados mediante el modelo de red Perceptron Multilayer de dos capas para diferentes escenarios de sequía hidrológica en la presa Sanalona vs los observados en el año 2016. El mejor escenario resulto ser el Estimado, cuya combinación de coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el de concordancia de Willmott (d), ( $R^2=0,260$ ;  $d=0,711$ ), son mayores que los proporcionados por los escenarios año normal ( $R^2=0,094$ ;  $d=0,278$ ), Plan de Riego ( $R^2=0,044$ ;  $d=0,369$ ), año seco ( $R^2=0,035$ ;  $d=0,271$ ) y húmedo ( $R^2=0,007$ ;  $d=0,269$ ); el comportamiento del escenario Estimado resulto ser similar a lo observado, con excepción de los meses de febrero, mayo y junio y julio, los primeros tres meses son de bajo escurrimiento, en los últimos tres meses el SDI Estimado fue marcadamente mayor que el SDI observado; en cambio, los SDI fueron muy parecidos en los meses de mayor escurrimiento agosto, septiembre y octubre (Figura 3.66). Los escenarios normal, seco y húmedo fueron notablemente diferentes al observado, el escenario de año húmedo fue muy superior y los escenarios Plan de Riego y seco muy inferiores a lo observado. Los escenarios Observado y Estimado mantuvieron los valores de los índices dentro de la fase Normal, el escenario Año Húmedo presento valores entre las fases Normal y humedad

ligera; y los escenarios presentaron valores de SDI en fases de Normal a sequía ligera, los valores más bajos los presentaron en los meses de septiembre y octubre.

Tabla 3.24: Evaluación de escenarios de sequía hidrológica (SDI) mensual en la presa Sanalona, estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas vs los valores observados, para el año 2016, utilizando los criterios:  $R^2$ , d, MAE, MRSE y %MRSE (CDE), (n=12).

Fecha	Observado	Estimado	Plan de Riego	Año Seco	Año Normal	Año Húmedo
ene-16	-0,23	-0,37	-1,29	-0,93	-0,26	-0,73
feb-16	0,39	-0,39	0,59	-0,36	0,01	0,33
mar-16	0,00	-0,08	-0,55	-0,29	-0,27	0,32
abr-16	0,18	0,11	-0,42	-0,19	-0,51	0,63
may-16	0,18	0,98	-0,11	-0,05	-0,30	-0,09
jun-16	-0,24	0,39	-0,02	-0,31	0,59	1,11
jul-16	-0,31	0,12	-0,99	0,15	-0,26	1,66
ago-16	0,86	0,89	-1,11	-1,25	-0,56	0,23
sep-16	-0,18	-0,14	-0,97	-1,72	0,31	-0,40
oct-16	0,19	0,15	-1,49	-1,54	0,03	1,50
nov-16	-0,17	-0,14	-1,33	-0,62	0,06	0,58
dic-16	-0,23	-0,33	-1,26	-0,83	-0,75	0,38
<b>CDE</b>	$R^2$	0,2599286	0,043728	0,0345	0,09388	0,00685
	d	0,7111943	0,369145	0,27118	0,277579	0,26908
	MAE	0,2623218	0,852429	0,7741	0,461307	0,70527
	RMSE	0,394707	1,007654	0,99698	0,592456	0,88724
	%RMSE	1066,084	2721,623	2692,8	1600,193	2396,38979



Figuras 3.66. Escenarios de sequías hidrológicas SDI mensuales pronosticados vs observados en la presa Sanalona, del SHRC, para los meses del año 2016.



## Indicador Ie

En la Tabla 3.25 y Figura 3.67, se comparan los valores de Ie mensuales, determinados considerando los valores de escurrimiento mensual de ingreso al vaso estimados mediante el modelo de red Perceptron Multilayer de dos capas, el almacenamiento al primer día de cada mes y las extracciones para diferentes escenarios de sequía hidrológica en la presa Sanalona vs los observados en el año 2016. El mejor escenario resulto ser el Estimado, cuyo coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el de concordancia de Willmott (d) son mayores al 96% ( $R^2=0,961$ ;  $d=0,988$ ), seguido del escenario Año Normal ( $R^2=0,958$ ;  $d=0,985$ ) y de los escenarios húmedo ( $R^2=0,849$ ;  $d=0,940$ ), Plan de Riego ( $R^2=0,432$ ;  $d=0,786$ ), año seco ( $R^2=0,684$ ;  $d=0,698$ ); el comportamiento del escenario Estimado resulto ser el más cercano al Observado, (Figura 3.67), cuyos diferenciales entes los valores observados y estimados fueron muy pequeños, a excepción de los correspondientes a los meses de febrero, mayo y junio; no así los escenarios normal, seco y húmedo cuyos diferenciales de valores son más notables, principalmente el correspondiente al año seco, esto es debido a que este año fue muy lluvioso por el desarrollo del Monzón Mexicano y la presencia del fenómeno El Niño; puede apreciarse que en los meses lluviosos (junio a septiembre) los valores del Ie del año húmedo fueron ligeramente superiores a los Ie de los escenario Observado y Estimado. En la Figura, se aprecia que los valores de Ie inician en diferentes Situaciones por encima de la fase de Emergencia ( $Ie > 0,15$ ); el escenario más favorable de inicio es el correspondiente al Plan de Riego, el cual inicia en la situación de Prealerta ( $Ie = 0,38$ ) y desciende a Situación de Alerta en el mes de junio, durante las lluvias asciende a Situación Estable en Julio donde se mantiene hasta el mes de septiembre, en octubre desciende a Situación de Alerta en donde se mantiene hasta el mes de diciembre; en la realidad los Ie observados, en enero iniciaron en Situación de Prealerta, descendió hasta Situación de Emergencia en los meses de mayo y junio, ascendiendo a Situación Estable en el mes de junio, manteniendo la Normalidad hasta el mes de octubre, luego en noviembre desciende a Situación de Prealerta y así concluye en diciembre; el escenario Seco que es el más desfavorable iniciaría en enero en Situación de Alerta, en el transcurrir de los meses descendería a Situación de Emergencia en junio, ascendería a situación de Prealerta en julio en donde se mantendría hasta el mes de septiembre, en octubre descendería a Situación de Alerta y en diciembre a Situación de Emergencia. El escenario Estimado tendría un comportamiento

muy similar al Observado. En este año el escenario de Año Normal (condiciones climatológicas y de escurrimiento similares al año 2014).

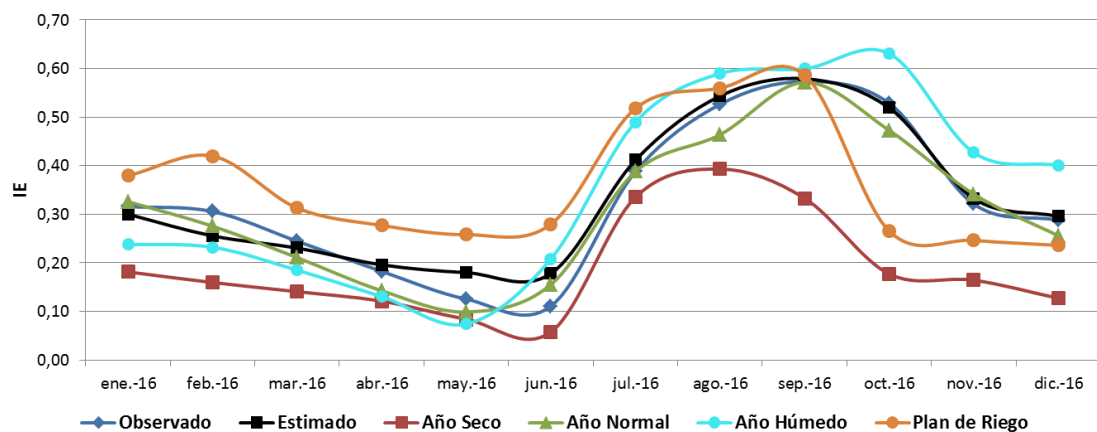
El análisis del comportamiento de los diferentes escenarios, todos ellos posibles, indica que los escenarios Año Húmedo, Plan de Riego, Estimado, Año Normal y el Observado llegan al mes de septiembre en Situación Estable, y al inicio de la temporada del ciclo agrícola 2016-2017 en diferentes Situaciones: Normalidad para escenario de Año Húmedo, Estimado y Observado, Prealerta para escenario de Año Normal, y Alerta para los escenarios Plan de Riego y Año Seco.

Estos resultados indican que la rápida respuesta de cuenca del río Tamazula y la Presa Sanalona ante la temporada de lluvias de verano y el proceso recarga-extracción es desfavorable ante situaciones de Año Seco, ya que debido a la relativamente baja capacidad de la presa y la alta demanda para los diferentes usos, principalmente el agrícola, es poco resiliente a la sequía; se pueden dar diferentes combinaciones de escenarios en dos años consecutivos, siendo las más desfavorables las combinaciones de escenarios Plan de Riego con Año Seco, Año Seco con Año Seco y Año Seco con Plan de Riego; ante la ocurrencia de estas posibles combinaciones adquiere importancia la disminución de los volúmenes de extracción de acuerdo a lo establecido en el Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de Sequías del Consejo de Cuenca de los Ríos Mocorito al Quélite (Torrecillas *et al.*, 2013) y la puesta en marcha de proyectos específicos para mitigar y prevenir las sequías (Torrecillas *et al.*, 2015) y los programas para un mejor manejo del agua para las ciudades (Miguel *et al.*, 2013) y (Miguel *et al.*, 2015). Así mismo, resalta la necesidad de contar con un Sistema Operativo de Pronóstico de Sequías más asertivo, basado en las condiciones de circulación general de la atmósfera, conocimiento del comportamiento de los diferentes forzantes de la lluvia en nuestra región como son: Las Bajas Térmicas, Forzamiento Orográfico, Ciclones Tropicales, El Monzón Mexicano y el fenómeno El Niño; lo cual es el espíritu de esta propuesta de determinación de escenarios de sequía mediante el análisis multivariado temporal y el producto de esta investigación.

Tabla 3.25: Evaluación de escenarios de sequía hidrológica (Ie) mensual en la presa Sanalona, estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas vs los valores observados, para el año 2016, utilizando los criterios:  $R^2$ , d, MAE, MRSE y %MRSE (CDE), (n=12).

Fecha	Observado	Estimado	Plan de Riego	Año Seco	Año Normal	Año Húmedo
ene-16	0,32	0,30	0,38	0,18	0,33	0,24
feb-16	0,31	0,26	0,42	0,16	0,28	0,23
mar-16	0,24	0,23	0,31	0,14	0,21	0,18
abr-16	0,18	0,20	0,28	0,12	0,14	0,13
may-16	0,13	0,18	0,26	0,08	0,10	0,07
jun-16	0,11	0,18	0,28	0,06	0,16	0,21
jul-16	0,39	0,41	0,52	0,34	0,39	0,49
ago-16	0,53	0,54	0,56	0,39	0,46	0,59
sep-16	0,57	0,58	0,59	0,33	0,57	0,60
oct-16	0,53	0,52	0,27	0,18	0,47	0,63
nov-16	0,32	0,33	0,25	0,16	0,34	0,43
dic-16	0,29	0,30	0,24	0,13	0,26	0,40
<b>CDE</b>	R2	0,9605072	0,43183	0,68364	0,95771	0,84874
	d	0,9878623	0,78617	0,69784	0,98495	0,93996
	MAE	0,0242586	0,10074	0,13634	0,02979	0,07701
	RMSE	0,031421	0,11995	0,16097	0,03523	0,08133
	%RMSE	9,6434383	36,8146	49,4035	10,8112	24,96242

Índice de Estado Presa Sanalona (2016)  
Evaluación de Escenarios



Figuras 3.67. Escenarios de sequías hidrológicas (Ie) mensuales pronosticados vs observados en el la presa Sanalona, del SHRC, para los meses del año 2016.

## EVALUACIÓN DE ESCENARIOS EN LA PRESA ADOLFO LÓPEZ MATEOS

### Indicador Q

En la Tabla 3.26 y Figura 3.68, se comparan los valores de escurrimiento mensuales Q ( $\text{hm}^3$ ), determinados mediante el modelo de red Perceptron Multilayer de dos capas para diferentes escenarios de sequía hidrológica en la presa Adolfo López Mateos vs los observados en el año 2016. Los escenarios considerados fueron para año seco, año normal y año húmedo, considerando condiciones similares a los años 2011, 2014 y 2015, respectivamente; además, de los escenarios considerados en el Plan de Riego del DR010 y el Estimado considerando los datos de precipitación, temperaturas media, máxima y mínima, y evaporación registrados en las estaciones climatológicas con influencia en la cuenca del río Humaya arriba de la presa Adolfo López Mateos, así como los índices de escurrimiento mensual estimados para el año 2016.

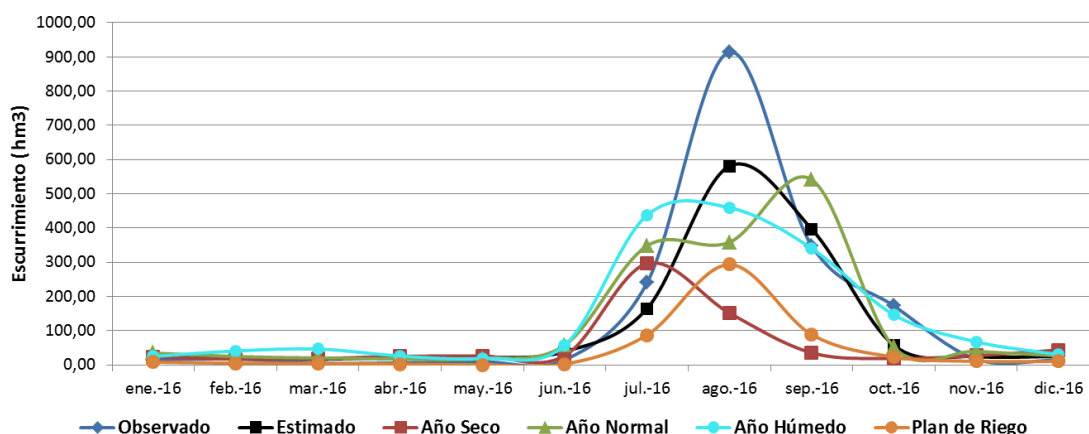
El mejor escenario resultó ser el Estimado, cuya combinación de los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y el de concordancia de Willmott ( $d$ ) son mayores al 91% ( $R^2=0,919$ ;  $d=0,939$ ), seguido del año húmedo ( $R^2=0,724$ ;  $d=0,869$ ) y de los escenarios de años Normal ( $R^2=0,529$ ;  $d=0,804$ ), Plan de Riego ( $R^2=0,979$ ;  $d=0,681$ ) y seco ( $R^2=0,254$ ;  $d=0,457$ ); el comportamiento del escenario Estimado resultó ser muy similar a lo observado en la realidad (Figura 3.68), cuyos diferenciales entre los valores observados y estimados fueron muy pequeños, a excepción del valor del mes de agosto; no así los escenarios normal, seco, Plan de Riego y húmedo cuyos diferenciales de valores son más notables, principalmente el correspondiente a los escenarios año seco y Plan de Riego. En la Figura, se aprecia que los diferenciales de valores para los primeros seis meses del año (de enero a junio) entre los observados y proporcionados por los distintos escenarios son muy pequeños; en cambio, el diferencial entre dichos valores para los meses de lluvias de verano y temporada de ciclones tropicales (meses de julio a octubre) es muy notable, a excepción a los proporcionado por el escenario Estimado, que solamente hubo diferencia notable en el mes de agosto, el más lluvioso del año en la cuenca del río Culiacán. Al igual que en la presa Sanalona, es notable el escenario de plan de riego, ya que tiene un coeficiente de determinación es muy elevado ( $R^2=0,979$ ), el de concordancia no es tan alto

( $d=0,681$ ), esto indica que los valores estimados por la Función de Probabilidad al 98% son similares en la forma, con notables diferenciales de los valores estimados y observados para los meses de la temporada de lluvia de verano (meses de julio octubre).

Tabla 3.26: Evaluación de escenarios de sequía hidrológica (Q) mensual en la presa Adolfo López Mateos (ALM), estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas vs los valores observados, para el año 2016, utilizando los criterios (CDE):  $R^2$ ,  $d$ , MAE, MRSE y %MRSE, (n=12).

Fecha	Observado	Estimado	Plan de Riego	Año Seco	Año Normal	Año Húmedo
ene-16	14,60	25,18	8,22	23,42	34,99	24,90
feb-16	17,70	19,62	5,27	17,35	24,73	40,96
mar-16	5,49	17,20	4,49	18,66	20,43	46,71
abr-16	6,21	21,34	2,75	25,31	17,45	26,33
may-16	9,60	21,37	0,42	26,62	18,95	19,28
jun-16	14,82	39,08	2,74	26,95	58,11	57,38
jul-16	240,29	164,97	87,56	296,38	348,24	437,70
ago-16	914,47	580,96	293,57	152,04	358,43	459,70
sep-16	348,67	397,34	88,92	35,52	541,60	341,05
oct-16	172,76	57,36	23,27	19,21	52,05	146,53
nov-16	16,96	24,65	10,66	27,22	39,82	67,94
dic-16	14,37	25,04	10,40	43,92	26,64	30,36
<b>CDE</b>	R2	0,91893664	0,9791917	0,2538295	0,528966667	0,7238
	d	0,93924571	0,6806845	0,4568641	0,804465559	0,8693
	MAE	55,5529232	103,13995	116,30038	93,25016475	75,0124
	RMSE	105,660752	203,95218	242,91972	177,0294572	145,5005
	%RMSE	71,3948119	137,81018	164,14049	119,6185392	98,3144

### Volumen de Escorrimento Presa Adolfo López Mateos (2016) Evaluación de Escenarios



Figuras 3.68. Escenarios de sequías hidrológicas (Q) mensuales pronosticados y observados en la presa El Varejonal, del Sistema Hídrico del Río Culiacán (SHRC), para el año 2016.

En la Figura 3.65, correspondiente a los escenarios para volumen de escurrimiento mensual de ingreso a la presa Sanalona, se observa que los escenarios más desfavorables son los correspondientes a un año con sequía en diferentes fases, desde sequía incipiente hasta sequía extrema, como lo fue 2011 y al del Plan de Riego, inclusive este último con menor volumen acumulado anual; de igual forma, en la Figura 3.68, se observa que los escenarios para volumen de escurrimiento mensual de ingreso a la presa Adolfo López Mateos del año con sequía similar a la del año 2011 y el correspondiente a del Plan de Riego son los más desfavorables, similares entre sí en la forma, pero con desfase de un mes uno con respecto al otro. En ambos casos, los escenarios para volúmenes de escurrimiento de ingreso a las presas Sanalona y Adolfo López Mateos el de Plan de Riego es el más desfavorable; esto le permite a los operadores del Distrito de Riego #010 estar del lado conservador o de la seguridad para una mayor resiliencia ante eventos extremos de sequía.

Por otra parte, los resultados del análisis de escenarios de sequías hidrológicas en ambas presas, indican que el mejor escenario es el que proporcionan los volúmenes pronosticados mediante el modelo de red Perceptron Multilayer de dos capas, esto es debido a que se conocen las variables de precipitación, temperaturas y los índices de escurrimiento; si bien es cierto, el modelo propuesto permite un mejor ajuste entre valores

estimados y observados cuando son conocidas dichas variables, la incertidumbre del pronóstico de los escurrimientos de ingreso mensuales a los vasos de las presas sigue siendo alta; para aumentar la certidumbre es necesario apoyarse en otros análisis del clima y eventos climáticos asociados a la zona de estudio; por ejemplo, utilizar las perspectivas climáticas que elabora el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para los siguientes tres meses a partir del mes del pronóstico (SMN, 2017); Otras variantes que se pueden utilizar son los índices que representan a los diferentes fenómenos climáticos que afectan esta zona; como por ejemplo, los índices de anomalía de la Temperatura de Superficie del Mar (SST) que indican el desarrollo del fenómeno El Niño/La Niña en conjunto con observaciones locales del clima, ya que por sí solo los SST no son suficientes para pronosticar los fenómenos climáticos en nuestro país, coincidiendo con Magaña (2015).

Se puede afirmar, que el modelo de red Multilayer Perceptron de dos capas es una herramienta adecuada para determinar sequías hidrológicas en las cuencas y presas del OCPN, ante diferentes escenarios climáticos y la dificultad para pronosticar volúmenes de escurrimiento y/o de ingreso a los vasos de las presas principales del OCPN estriba en la certidumbre de los datos de entrada al modelo; entre más certeros son los datos de entrada más confiable son los pronósticos de los volúmenes de escurrimiento Q.

### **Indicador SDI**

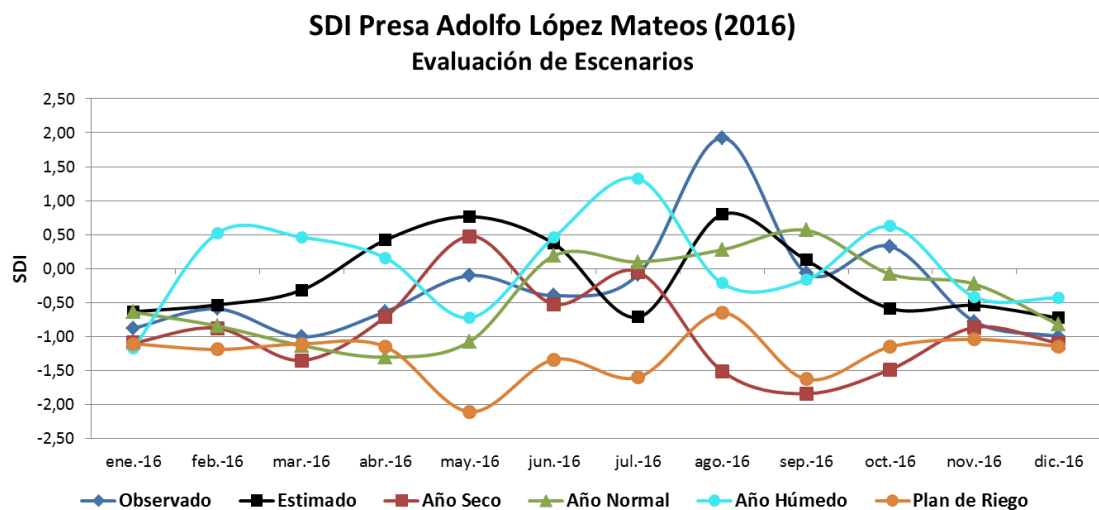
En la Tabla 3.27 y Figura 3.69, se comparan los valores de SDI mensuales, determinados con los valores de escurrimiento estimados mediante el modelo de red Perceptron Multilayer de dos capas para diferentes escenarios de sequía hidrológica en la presa El Varejonal vs los observados en el año 2016. El mejor escenario resultó ser el Estimado, cuya combinación de coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el de concordancia de Willmott (d), ( $R^2=0,287$ ;  $d=0,707$ ), son mayores que los proporcionados por los escenarios año normal ( $R^2=0,316$ ;  $d=0,710$ ), año seco ( $R^2=0,032$ ;  $d=0,367$ ), Plan de Riego ( $R^2=0,042$ ;  $d=0,374$ ), y húmedo ( $R^2=0,009$ ;  $d=0,356$ ); Si bien es cierto el escenario Estimado resultó ser el más aproximado a lo observado, los diferenciales de valores de SDI entre ambos son muy grandes, a excepción de los meses de enero, febrero, septiembre, noviembre y diciembre que son de bajo escurrimiento, en los meses de estiaje los SDI

Estimados fueron marcadamente mayores que el SDI observados; en cambio, en los meses de lluvia de verano de julio a octubre, a excepción del mes de septiembre, los SDI observados fueron superiores a los Estimados, debido a que esta temporada de lluvia se desarrolló el Monzón Mexicano debido a la influencia del fenómeno de El Niño (SMN, 2016), (Figura 3.69). Los escenarios normal, seco y húmedo fueron notablemente diferentes al observado, el escenario de año húmedo fue muy superior en algunos meses febrero, marzo, abril, junio, julio y octubre, en agosto el SDI observado fue superior y en noviembre y diciembre fueron similares; los escenarios Plan de Riego y seco muy inferiores a lo observado, principalmente en los meses lluviosos. Los escenarios Observado y Estimado mantuvieron los valores de los índices dentro de la fase Normal, con excepción del mes de agosto en donde el SDI observado alcanzó la fase humedad ligera; el escenario Año Húmedo presentó valores entre las fases Normal y humedad ligera, la cual presentó en el mes de julio; el escenario Año Seco presentó valores dentro de la fase Normal en los meses febrero, abril-julio y noviembre, y fase de sequía ligera en los meses de enero, marzo, agosto, septiembre, octubre y diciembre. Finalmente, el escenario Plan de Riego se mantuvo en fase de sequía ligera en la mayor parte del año, a excepción de los meses de mayo con sequía Moderada y agosto con fase de Normalidad.



Tabla 3.27. Evaluación de escenarios de sequía hidrológica (SDI) mensual en la presa Adolfo López Mateos, estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas vs los valores observados, para el año 2016, utilizando los criterios (CDE):  $R^2$ , d, MAE, MRSE y %MRSE, (n=12).

Fecha	Observado	Estimado	Plan de Riego	Año Seco	Año Normal	Año Húmedo
ene-16	-0,88	-0,64	-1,11	-1,10	-0,64	-1,17
feb-16	-0,60	-0,54	-1,19	-0,88	-0,85	0,52
mar-16	-1,01	-0,32	-1,11	-1,35	-1,14	0,46
abr-16	-0,64	0,42	-1,15	-0,71	-1,31	0,16
may-16	-0,11	0,76	-2,11	0,48	-1,08	-0,73
jun-16	-0,40	0,37	-1,34	-0,53	0,19	0,46
jul-16	-0,09	-0,72	-1,60	-0,05	0,10	1,32
ago-16	1,92	0,80	-0,65	-1,51	0,27	-0,22
sep-16	-0,07	0,12	-1,63	-1,84	0,56	-0,17
oct-16	0,33	-0,59	-1,15	-1,49	-0,08	0,62
nov-16	-0,78	-0,54	-1,04	-0,87	-0,23	-0,42
dic-16	-1,00	-0,73	-1,15	-1,10	-0,83	-0,43
CDE	R <sup>2</sup>	0,2871962	0,04202	0,03226	0,315845	0,0094
	d	0,706929	0,373851	0,36664	0,709502	0,3562
	MAE	0,5878205	0,994687	0,74032	0,537451	0,8365
	RMSE	0,6873044	1,266783	1,2543	0,678787	1,0161
	%RMSE	-248,4912	-457,9985	-453,485	-245,412	-367,3802



Figuras 3.69. Escenarios de sequía hidrológicas (SDI) mensuales pronosticados y observados en la presa El Varejónal del Sistema Hídrico del Río Culiacán (SHRC), para el año 2016.

## Indicador Ie

En la Tabla 3.28 y Figura 3.70 se comparan los valores de Ie mensuales, determinados a partir de los valores de escurrimiento mensual de ingreso al vaso estimados mediante el modelo de red Perceptron Multilayer de dos capas, el almacenamiento al primer día de cada mes y las extracciones para diferentes escenarios de sequía hidrológica en la presa El Varejonal vs los observados en el año 2016. El mejor escenario resulto ser el Estimado, cuyo coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el de concordancia de Willmott (d) son mayores al 95% ( $R^2=0,960$ ;  $d=0,961$ ), seguido del escenario Año húmedo ( $R^2=0,950$ ;  $d=0,945$ ) y de los escenarios Año Normal ( $R^2=0,927$ ;  $d=0,724$ ), Plan de Riego ( $R^2=0,769$ ;  $d=0,617$ ), año seco ( $R^2=0,003$ ;  $d=0,362$ ); el comportamiento del escenario Estimado resulto ser similar al Observado, (Figura 3.70), cuyos diferenciales entes los valores observados y estimados fueron muy pequeños, a excepción de los correspondientes a los meses de mayo y junio en donde lo observado fue menor a los estimado y agosto, septiembre y octubre en donde lo observado fue mayor a lo estimado, lo que confirma que el año 2016 fue un año lluvioso inclusive mayor al 2015, debido al desarrollo del Monzón Mexicano por la influencia del fenómeno El Niño (SMN, 2016); el escenario de Año Húmedo (condiciones similares al año 2015) fue superado por el escenario Observado en todo el año, siendo similares en su comportamiento y valores a excepción de abril, mayo y junio; en cambio, los escenarios de Año Normal (condiciones similares a 2014), Plan de Riego y Año seco presentan diferenciales de valores más notables, principalmente el correspondiente al año seco; puede apreciarse que en los meses lluviosos (junio a septiembre) donde hay mayor escurrimiento y se recuperan las presas, los valores del Ie del escenarios año seco, Plan de Riego y Año Normal son notablemente inferiores a los Ie de los escenarios Observado y Estimado. En la Figura, se aprecia que los valores de Ie inician en situación de prealerta ( $0,50 > Ie > 0,30$ ), a excepción del escenario Observado que inicia en situación estable ( $Ie = 0,51$ ), siendo el más favorable de inicio, descendiendo a situación de alerta en el mes de junio, durante las lluvias en el mes de agosto asciende a situación estable, donde se mantiene hasta finalizar el año en el mes de diciembre; El escenario Estimado tiene un comportamiento similar al Observado. Los escenarios de Año Húmedo y Año Normal tienen un comportamiento similar al Observado pero con diferenciales de valor mayores que los del escenario Estimado, estando en situación de alerta en los meses de abril, mayo

y junio, y terminando el año en situación de prealerta; en el escenario Seco se inicia en enero en situación de prealerta, desciende a situación de alerta en junio, en la temporada de lluvias presenta poca recuperación y continua en situación de alerta hasta el cierre del año en diciembre.

El análisis del comportamiento de los diferentes escenarios, todos ellos posibles, indica que los escenarios Año Húmedo, Año Normal, Plan de Riego, Estimado y el Observado llegan al mes de octubre (inicio de la temporada del ciclo agrícola 2016-2017) en situación estable, conservándose así hasta el final del año, a excepción de los escenarios Plan de Riego y Año Normal que terminan el año 2016 en situación de prealerta; el escenario de Año Seco concluye el año en situación de emergencia.

Estos resultados indican que la presa El Varejonal al tener mayor capacidad de almacenamiento y la cuenca del río Humaya mayor tamaño y capacidad de generar mayores escurrimientos en temporada de lluvias de verano (junio a octubre), ofrece mayor capacidad de resiliencia que la Presa Sanalona ante escenarios de sequías extremas que recurrentemente afectan a esta región (Ravelo, 2012; Ravelo *et al.*, 2015; Sanz *et al.*, 2012; Douriet *et al.*, 2014). Al igual que en la presa Sanalona, se pueden dar diferentes combinaciones de escenarios en dos años consecutivos, siendo la más desfavorable la combinación de escenarios Año Seco con Año Seco y ante la posible ocurrencia de esta combinación se recomiendan las mismas acciones de disminución de los volúmenes de extracción de acuerdo a lo establecido en el PMPMS del Consejo de Cuenca de los Ríos Mocerito al Quelite (Torrecillas *et al.*, 2013) y la puesta en marcha de proyectos específicos para mitigar y prevenir las sequías (Torrecillas *et al.*, 2015) y los programas para un mejor manejo del agua para las ciudades (Miguel *et al.*, 2015).

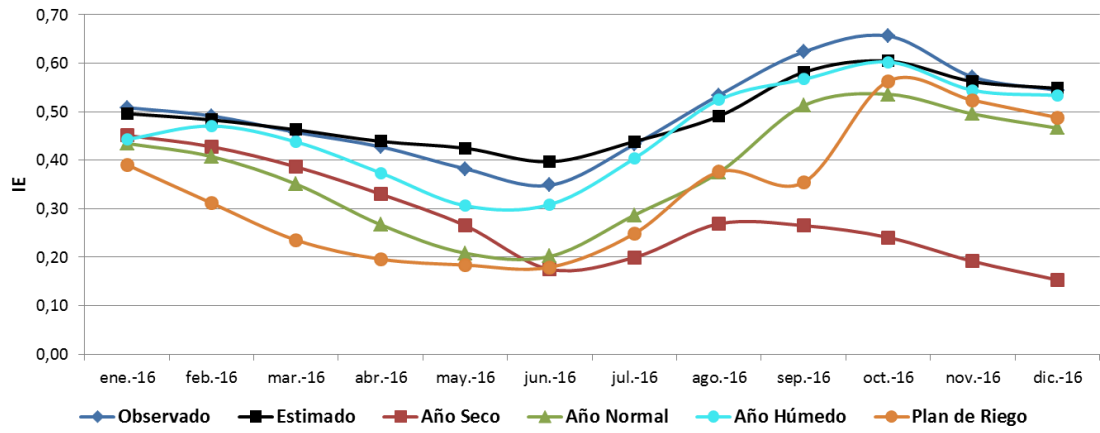
Así mismo, resalta la necesidad de contar con un Sistema Operativo de Pronóstico de Sequías más asertivo, basado en las condiciones de circulación general de la atmósfera, conocimiento del comportamiento de los diferentes forzantes de la lluvia en nuestra región como son: Las Bajas Térmicas, Forzamiento Orográfico, Ciclones Tropicales, El Monzón Mexicano y el fenómeno El Niño; lo cual es el espíritu de esta propuesta de determinación

de escenarios de sequía mediante el análisis multivariado temporal, producto de esta investigación.

Tabla 3.28. Evaluación de escenarios de sequía hidrológica (Ie) mensual en la presa Adolfo López Mateos, estimados mediante la Red Neuronal Multilayer Perceptron de 2 capas vs los valores observados, para el año 2016, utilizando los criterios (CDE):  $R^2$ , d, MAE, MRSE y %MRSE, (n=12).

Fecha	Observado	Estimado	Plan de Riego	Año Seco	Año Normal	Año Húmedo
ene-16	0,51	0,50	0,39	0,45	0,43	0,44
feb-16	0,49	0,48	0,31	0,43	0,41	0,47
mar-16	0,46	0,46	0,24	0,39	0,35	0,44
abr-16	0,43	0,44	0,20	0,33	0,27	0,37
may-16	0,38	0,42	0,18	0,27	0,21	0,31
jun-16	0,35	0,40	0,18	0,18	0,20	0,31
jul-16	0,43	0,44	0,25	0,20	0,29	0,40
ago-16	0,53	0,49	0,38	0,27	0,38	0,52
sep-16	0,62	0,58	0,35	0,27	0,51	0,57
oct-16	0,66	0,60	0,56	0,24	0,54	0,60
nov-16	0,57	0,56	0,52	0,19	0,50	0,54
dic-16	0,54	0,55	0,49	0,15	0,47	0,53
<b>CDE</b>	R2	0,9598468	0,7694208	0,00259	0,927073	0,9497
	d	0,9609521	0,6168021	0,36187	0,724163	0,9447
	MAE	0,0237264	0,1606418	0,21866	0,119693	0,0386
	RMSE	0,0302476	0,173849	0,25644	0,124761	0,0440
	%RMSE	6,0712557	34,89475	51,4726	25,04185	8,8363

### Índice de Estado Presa Adolfo López Mateos (2016) Evaluación de Escenarios



Figuras 3.70: Escenarios de sequías hidrológicas Ie mensuales pronosticados vs observados en la presa El Varejonal, del SHRC, para los meses del año 2016.

## **METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS MULTIVARIADO TEMPORAL Y PRONÓSTICO DE SEQUÍAS HIDROLÓGICAS, MEDIANTE EL USO DE REDES NEURONALES, VARIABLES METEOROLÓGICAS, VOLÚMENES DE ESCURRIMIENTO E ÍNDICES DE SEQUÍA HIDROLÓGICA (SDI)**

Los pasos a seguir para el pronóstico de sequías hidrológicas son:

1. Seleccionar la cuenca de estudio
2. Determinar la estación hidrométrica con registros históricos de escurrimientos y las estaciones climatológicas con influencia en la cuenca.
3. Conformar la base de datos climatológicos ( Precipitación (P), Evaporación (EVP), Temperatura media (Tm), Temperatura Mínima (Tmin) y Temperatura Máxima (Tmax)) e hidrométricos (Volúmenes de escurrimiento mensual (Vem), de acuerdo al formato requerido.
4. Estimar el índice de Escurrimiento de Sequías (SDI), usando los volúmenes de escurrimiento mensual de la estación hidrométrica o presa seleccionada.
5. Incluir en la base de datos el índice SDI, estimado en el punto anterior.
6. Convertir los registros de la base de datos del formato Excel a formato .CSV
7. Aplicar la función SENO de Excel a los meses del año.
8. Aplicar la función Aleatoria de Excel a la base de datos.
9. Seleccionar la Red Neuronal para el pronóstico de los volúmenes de escurrimiento mensual (Vem).
10. Ubicar el archivo de datos en formato .CSV (puntos 6, 7 y 8)
11. Construir la Red de Neuronas seleccionando las variables de entrada: P, EVP, Tm, Tmin, Tmax y SDI, y las de salida: Q
12. Efectuar la validación cruzada y prueba de datos.
13. Seleccionar el número de capas ocultas
14. Seleccionar la función de Transferencia
15. Seleccionar el “Learning Rule”
16. Seleccionar el número máximo de iteraciones (Maximum Epochs)
17. Construir la configuración de prueba
18. Construir la Red Neuronal
19. Seleccionar los archivos de datos de ingreso y la variable de salida deseada

20. Llevar a cabo la Validación (Testing), exportando los resultados a un archivo de datos .txt.
21. Graficar los resultados de la Validación.
22. Estimar los errores de la Validación, por diferentes métodos.
23. Hacer el Pronóstico (Producción).
24. Exportar los resultados de la Producción a un archivo .txt)
25. Graficar los resultados del Pronóstico (Producción)
26. Estimar los errores producidos por el Pronóstico, mediante el Programa Errores.xlsx
27. Salvar y guardar la neurona con el mejor ajuste y con error aceptable.
28. Repetir el procedimiento con otras redes neuronales, de diferente tipo y estructura.
29. Comparar mediante métodos estadísticos el mejor ajuste o la mejor red neuronal que pueda representar el pronóstico de los escurrimientos futuros conforme se avance en el tiempo.
30. Aplicar la mejor red neuronal seleccionada para el pronóstico de los volúmenes de escurrimiento que se registrarán en las estaciones hidrométricas o ingresarán a los embalses de las presa, en los siguientes tres meses, mes a mes.
31. Estimar los índices de Escurrimiento de sequía (SDI), asociados a los volúmenes de escurrimiento pronosticados para los siguientes tres meses.
32. Clasificar la fase de la sequía hidrológica esperada para los tres meses siguientes, con base en los índices SDI estimados en el punto anterior.
33. Estimar el índice de estado de las presas (Ie), para los siguientes tres meses; considerando los volúmenes de ingreso a las presas pronosticados en el punto 30, los volúmenes de la demanda futura de los siguientes tres meses y el volumen de almacenamiento esperado al primer día de cada uno de los meses para los que se estimara el índice de estado.
34. Replicar esta metodología a otras cuencas y a otros casos específicos del OCPN y del país.

Esta metodología es aplicable cuando conocemos o podemos conocer de alguna manera las condiciones climáticas a presentarse en los meses siguientes. Si bien es cierto, podemos auxiliarnos en los métodos de pronóstico meteorológicos estos aun presentan un

alto grado de incertidumbre, lo que haría al pronóstico de sequías hidrológicas poco confiable.

Dentro del análisis de perspectivas de sequías hidrológicas, usando redes neuronales, podemos considerar los siguientes casos del pronóstico de los volúmenes e índices de escurrimiento:

- Construir una RNA que nos permita pronosticar los volúmenes de escurrimiento (Q), para los siguientes tres meses, sin conocer el comportamiento futuro de las variables climatológicas ni el índice de escurrimiento (SDI).
- Crear una RNA que nos permita pronosticar los índices de escurrimiento (SDI) para los siguientes tres meses, sin conocer el comportamiento futuro de las variables climatológicas ni los volúmenes de escurrimiento (Q).
- Aplicar una RNA que pronostique los volúmenes de escurrimiento (Q) a partir del pronóstico estacional del clima; en este caso las temperaturas pronosticadas no tendrán tanta variación e incertidumbre como la lluvia.
- Aplicar una RNA que pronostique los volúmenes de escurrimiento (Q) a partir del pronóstico de las variables climatológicas y los índices de escurrimiento SDI; usando redes neuronales Univariadas.



## **CAPÍTULO 4**

### **CONCLUSIONES GENERALES**

**Y**

### **RECOMENDACIONES**

## CONCLUSIONES GENERALES

1. El Sistema Operativo de Sequías (SOS) del Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN) monitorea fielmente los fenómenos meteorológicos extremos que recurrentemente afectan la región, como los períodos de sequía 1999-2000 y 2010-2013, la ocurrencia de un año seco (2013) hasta el mes de septiembre y termina con la ocurrencia del huracán Manuel, los efectos climatológicos del fenómeno del Niño y la activación del Monzón Mexicano en el año 2015.
2. El mayor número de estaciones climatológicas y el análisis a escala de cuenca que utiliza el SOS permite una mejor aproximación del monitoreo de la sequía meteorológica respecto a los monitores de mayor escala, como el Monitor de Sequías para América del Norte (NADM) y el Monitor de Sequías Mexicano (MDM), generando condiciones para una mejor estimación del riesgo a la sequía por municipio, cuenca y consejos de cuenca del OCPN.
3. El índice de escurrimientos SDI puede ser utilizado para el análisis de sequías hidrológicas y en la planeación de medidas preventivas ante eventuales sequías hidrológicas en el OCPN, para lo cual se debe tener en cuenta la tendencia que representen los registros de volúmenes de escurrimiento en los períodos secos ya que influye en la determinación de su ocurrencia.
4. No existe una relación directa entre la variabilidad climática en el OCPN y el fenómeno ENSO, como lo indican los valores no significativos del Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) resultantes del análisis de la variabilidad histórica de las variables de precipitación, escurrimiento, índices de sequía meteorológicos e hidrológicos con la temperatura superficial del mar (SST) en el Pacífico Ecuatorial en la zona 3.4 de la zona de ocurrencia del fenómeno, para el período de observación 1982-2015. Lo anterior indica una baja predictibilidad de los efectos del fenómeno a escalas locales y regionales, y refuerza el hecho de que si bien este fenómeno influye en la variabilidad climática y de

escurrimientos en nuestra región, no es el único forzante en la ocurrencia de las sequías en nuestro territorio, ya que estas dependen de muchos otros forzantes.

5. El análisis detallado del comportamiento de la variabilidad climática y de escurrimientos en el OCPN durante eventos El Niño muestra que cuando el fenómeno se encuentra en fase negativa (La Niña) con intensidades negativas menores a  $-1,07\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Niñas moderadas y fuertes) las probabilidades de ocurrencia de sequías meteorológicas en sus fases de incipiente a extrema es alta y si la intensidad es menor a  $-1,33\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Niñas Fuerte) y su duración es mayor a un año las probabilidades de ocurrencia de sequías meteorológicas e hidrológicas en sus fases fuerte y extrema crece a muy alta.
6. Los resultados de este trabajo validan la metodología para el monitoreo, evaluación y pronóstico de sequías meteorológicas que llevo adelante el Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN) (propuesta por el Dr. Andrés Ravelo durante las consultorías de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) bajo el auspicio del Proyecto del Manejo Integrado del Agua (PREMIA) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en el período 2007-2012).
7. El pronóstico de sequías meteorológicas mediante el índice PDSI con un mes de anticipo ha probado una alta asertividad, por lo que puede alimentar a otros modelos de multiescala como el SCADO de la Comunidad Europea e incorporar estos resultados al análisis de escala regional y local. Además, pueden servir de insumo para evaluar los impactos ambientales y de degradación de tierras por sequía para condiciones actuales y futuras mediante la aplicación de programas especializados (TERRAMA<sup>2</sup>).
8. El monitoreo y pronóstico de sequías meteorológicas con uno, dos y tres meses de anticipo puede llevarse a cabo para otras regiones o localidades de México, Latinoamérica o el mundo.

9. El modelo Multilayer Perceptron de dos capas fue la red neuronal que mejor pronosticó los volúmenes de ingreso mensual de agua a las presas El Varejonal y Sanalona, al obtener el mejor ajuste, con coeficiente de determinación mayor a  $R^2=0,92$  y concordancia de Willmott mayor a  $d=0,90$ , y errores estándares menores que los arrojados por los otros modelos de redes neuronales. Produce pronósticos asertivos para las diferentes condiciones hídricas (períodos secos, normalidad hídrica y húmedos).
10. Los pronósticos más precisos se dan cuando el escurrimiento es bajo, como ocurre en los meses de lluvia de invierno y los de estiaje, de diciembre de un año al junio del siguiente año; y las mayores brechas entre los valores observados y estimados se presentan en la temporada de lluvias de verano, de julio a octubre. En los períodos secos la red neuronal produce pronósticos asertivos o ligeramente sobrevaluados con respecto a lo observado, mientras que en año normal la brecha ocurre algo similar y en año e intervalos húmedos por lo general los pronósticos son ligeramente inferiores a los observados.
11. El pronóstico de los índices de estado (Ie) de las presas Sanalona y Varejonal llevado a cabo considerando el nivel que alcanzarían los vasos al primer día de cada mes, los volúmenes de escurrimiento mensual de ingreso al vaso de las presas, pronosticados mediante el modelo de red Perceptron Multilayer de dos capas y la aplicación del balance de agua para los siguientes meses, fueron altamente asertivos.
12. Los resultados del análisis de escenarios de sequías hidrológicas en las presas Sanalona y El Varejonal, indican que el mejor escenario es el que proporcionan los volúmenes pronosticados mediante el modelo de red Perceptron Multilayer de dos capas, esto es debido a que se conocen las variables de precipitación, temperaturas y los índices de escurrimiento; si bien es cierto, el modelo propuesto permite un mejor ajuste entre valores estimados y observados cuando son conocidas dichas variables, la incertidumbre del pronóstico de los escurrimientos de ingreso mensuales a los vasos de las presas sigue siendo alta.

13. En las presas El Varejonal y Sanalona, se pueden dar diferentes combinaciones de escenarios de sequía en dos años consecutivos, siendo la más desfavorable la combinación de escenarios Año Seco con Año Seco. Por otra parte, la presa El Varejonal al tener mayor capacidad de almacenamiento y la cuenca del río Humaya mayor tamaño y capacidad de generar mayores escurrimientos por lo que ofrece mayor capacidad de resiliencia que la Presa Sanalona ante escenarios de sequías extremas que recurrentemente afectan a esta región
  
14. Se puede afirmar, que el modelo de red Multilayer Perceptron de dos capas es una herramienta adecuada para determinar sequías hidrológicas en las cuencas y presas del OCPN, ante diferentes escenarios climáticos y la dificultad para pronosticar volúmenes de escurrimiento y/o de ingreso a los vasos de las presas principales del OCPN estriba en la certidumbre de los datos de entrada al modelo; entre más certeros son los datos de entrada más confiable son los pronósticos de los volúmenes de escurrimiento Q.
  
15. La metodología utilizada para estimar las vulnerabilidades Económica, Social, Ambiental y Global en la RHA3PN es adecuada; más sin embargo, es importante su revisión y ajuste para determinar las distintas vulnerabilidades de forma de lograr el mejor acercamiento con la realidad, con apoyo de los grupos sociales y expertos locales en la selección apropiada de los indicadores, la ponderación correcta de cada indicador y vulnerabilidad para establecer la vulnerabilidad global
  
16. Las herramientas desarrolladas en este trabajo para el monitoreo, evaluación, pronóstico, estimación de la vulnerabilidad y la determinación de escenarios de sequía en el Sistema Hídrico del Río Culiacán y el OCPN, contribuyen a una eficiente del riesgo y ofrece respuestas ante el desastre, y de adaptación al cambio climático.

## RECOMENDACIONES

- Pronosticar las sequías hidrológicas mediante la metodología propuesta en este trabajo en los otros sistemas hídricos del OCPN, existentes en los ríos Fuerte, Sinaloa, Mocorito, San Lorenzo, Elota, Presidio y San Pedro; así como en otras cuencas de México y del mundo.
- Investigar el pronóstico de sequías hidrológicas agregando como variables las componentes básicas de la transformación de la lluvia en escurrimiento: Topografía, Cobertura Vegetal, Uso y Tipo de Suelo.
- Desarrollar una línea de investigación para llevar a cabo pronósticos de sequías hidrológicas mediante redes neuronales considerando como variable el pivote lejano el índice de Oscilación del Sur que indica el desarrollo del fenómeno de El Niño, específicamente las anomalías de temperatura de la superficie del mar en la región 3.4 de la zona de El Niño en el Pacífico Ecuatorial.
- Aplicar este método de pronóstico de los índices de estado de las presas a todas las presas que conforman los sistemas hídricos del OCPN y los existentes en el país, a los efectos de planificar el uso del agua de los embalses y lograr una mayor resiliencia ante las sequías meteorológicas e hidrológicas más intensas y extremas.
- Desarrollar mediante una metodología especializada para estimar el riesgo por sequía en los municipios, cuencas y Consejos de Cuenca del OCPN, considerando la vulnerabilidad global estimada mediante la metodología utilizada en este trabajo y sus mejoras respectivas, la amenaza meteorológica, la calidad del agua superficial y subterránea medidas en índice ICA, el nivel de aguas en las presas, almacenamiento y disponibilidad de agua en los acuíferos y la amenaza de sequías hidrológicas.
- Ante la ocurrencia de la combinación de escenarios por sequía Año Seco con Año Seco se recomiendan las mismas acciones de disminución de los volúmenes de extracción de

acuerdo a lo establecido en el PMPMS del Consejo de Cuenca de los Ríos Mocorito al Quélite y la puesta en marcha de proyectos específicos para mitigar y prevenir las sequías y los programas para un mejor manejo del agua para las ciudades.

- Aumentar la certidumbre de los pronósticos y determinación de escenarios por sequía, apoyándose en los resultados de otros análisis del clima y eventos climáticos asociados a la zona de estudio; por ejemplo, utilizar las perspectivas climáticas que elabora el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para los siguientes tres meses a partir del mes del pronóstico (SMN, 2017); Otros variantes que se pueden utilizar son los índices que representan a los diferentes fenómenos climáticos que afectan esta zona; como por ejemplo, los índices de anomalía de la Temperatura de Superficie del Mar (SST) que indican el desarrollo del fenómeno El Niño/La Niña en conjunto con observaciones locales del clima, ya que por sí solo los SST no son suficientes para pronosticar los fenómenos climáticos en nuestro país.

- Mejorar la asertividad del Sistema Operativo de Pronóstico de Sequías, realizando estudios basados en las condiciones de circulación general de la atmósfera, conocimiento del comportamiento de los diferentes forzantes de la lluvia en nuestra región como son: Las Bajas Térmicas, Forzamiento Orográfico, Ciclones Tropicales, El Monzón Mexicano y el fenómeno El Niño.

- Llevar a cabo investigaciones para incrementar la precisión del monitoreo y pronóstico de sequías mediante el índice PDSI utilizando valores de humedad del suelo dinámicos en lugar de valores promedios en sus umbrales. Estos valores dinámicos pueden obtenerse mediante los valores de humedad proporcionados por las imágenes EUMETSAT, (Carrao, 2015; SCADO, 2013; EDO, 2016; Ravelo *et al.*, 2016), o con los datos CCI de humedad de suelo satelitales de la ESA: <http://www.esa-soilmoisture-cci.org/node/145>. ó utilizando el índice de humedad de suelo SWI disponible en el enlace del ESA Copernicus <http://land.copernicus.eu/global/products/swi>, ó con el producto de re-análisis del ECMWF ERA-Interim (ERA-Interim), último re-análisis atmosférico global producido por ECMWF, período del 1 de enero de 1979 hasta la fecha actual (EDO, 2017).

## BIBLIOGRAFÍA

- Abraham A., 2004. Meta learning evolutionary artificial neural networks. *Neurocomputing* 56, 1–38.
- Arreguín C., López P.M.A., Ortega G.D., Ibáñez H.O., 2016. La política pública contra la sequía en México: avances, necesidades y perspectivas. ISSN 2007-2422. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 63-76.
- Barbosa P., 2015. Observatorio Latino Americano de Sequías (SCADO) del JRC (Joint Research Center, European Commission). <http://edo.jrc.ec.europa.eu/scado>.
- Basogain, 1998. *Redes Neuronales Artificiales y sus Aplicaciones*. Texto de las publicaciones de la Escuela de Ingenieros y html: CampusVirtual-MaterialDocente-CursoRNA.
- Basogain, 2009. *Curso Redes Neuronales Artificiales y sus Aplicaciones*. Escuela Superior de Ingeniería de Bilbao, EHU; email: xabier.basogain@ehu.es.
- Basson M.S., van Rooyen, J.A., 2001. Practical application of probabilistic approaches to the management of water resource systems. *Journal of Hydrology* 241, 53-61.
- Beguiría S., Vicente-Serrano S.M., Martínez A., 2010. A multiscalar global drought dataset: the SPEI base – a new gridded product for the analysis of drought variability and impacts. *Bulletin of the American Meteorological Society* 91 (10), 1351–1356.
- Beran M.A., Rodier J.A., 1985. Hydrological aspects of drought. *Studies and reports in hydrology. International Hydrological Programme (PHI). UNESCO-WMO*.
- Berri G.J., 1996. El Niño y sus efectos en Argentina. CONICET. <http://www-atmo.at.fcen.uba.ar/tpopte/1996/child.htm>.
- Bocco M., Ovando G, 2013. *Notas sobre redes neuronales artificiales*. CREAN, UNC. 83 páginas.
- Bodri L., V.C'erma'Kb., 2000. Prediction of extreme precipitation using a neural network: application to summer flood occurrence in Moravia. *Advances in Engineering Software*, 31. 311–321.
- Bonaccorso B., Cancelliere A., Rossi G., 2012. Methods for drought analysis and forecasting. In: Balakrishnan, N. (Ed.), *Methods and Applications of Statistics in the Atmospheric and Earth Sciences*. John Wiley and Sons, Hoboken, pp. 150-184.



- Bonaccorso B., Cancelliere A., Rossi G., 2015. Probabilistic forecasting of drought class transitions in Sicily (Italy) using Standardized Precipitation Index and North Atlantic Oscillation Index. *Journal of Hydrology*,
- Bordi I., Sutera A., 2007. Drought monitoring and forecasting at large scale. In: Rossi, G. et al. (Eds.), *Methods and Tools for Drought Analysis and Management*. Springer.
- Bordit L., Fraedrich K., Gerstengarbe F.W., Werner P.C., Sutera A., 2004. Potential predictability of dry and wet periods: Sicily and Elbe-Basin (Germany). *Theoretical and Applied Climatology* 77, 125–138.
- Bradford R.B., 2000. Drought events in Europe. In: Vogt, J.V., Somma F. (Eds.), *Drought and Drought Mitigation in Europe*. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands, pp. 7–20.
- Brion G.M., Lingireddy S., 1999. A neural network approach to identifying non-point sources of microbial contamination. *Water Res.* 33, 3099±3106.
- Bruins H.J., 2003. Manejo del agua en periodos de sequía. *Ingeniería del agua* 10 (3), 327-335.
- Cancelliere A., G.D. Mauro B. Bonaccorso and G. Rossi, 2007: Drought forecasting using the standardized precipitation index. *Water Resour. Manage.*, 21, 801–819.
- Cancelliere A., G. Di Mauro B. Bonaccorso and G. Rossi, 2005: Stochastic forecasting of Standardized Precipitation Index. *Proc. 31<sup>st</sup> IAHR Congress, Seoul, Korea, IAHR*, 3252–3260.
- Carrao H., Russo S., Sepulcre G., Barbosa P., (2016). An empirical standardized soil moisture index for agricultural drought assessment from remotely sensed data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 48 (2016) 74-84. Journal home page: [www.elsevier.com/locate/jag](http://www.elsevier.com/locate/jag).
- Carrao H., Sepulcre G., Horion S., Barbosa P., 2013. A multitemporal and non-parametric approach for assessing the impacts of drought on vegetation greenness: a case study for Latin America. *EARSel e Proceedings* 12 (1), 8–24.
- Chang F.J., Chang L.C., Wang Y.S., 2007. Enforced self-organizing map neural networks for river flood forecasting. *Hydrological Processes* 21, 741–749.
- Chang Y.T., Chang L.C., Chang F.J., 2005. Intelligent control for modeling of real time reservoir operation: part II ANN with operating curves. *Hydrological Processes* 19, 1431–1444.

- Chiang Y.M., Chang F.J., Jou B.J.D., Lin P.F., 2007. Dynamic ANN for precipitation estimation and forecasting from radar observations. *Journal of Hydrology* 334, 250–261.
- Chiew F.H.S., T.C. Piechota J.A. Dracup and T.A. McMahon, 1998: El Niño/Southern Oscillation and Australian rainfall, stream flow, and drought: Links and potential for forecasting. *J. Hydrol.*, 204, 138–149.
- CIIFEN, 2017. <http://crc-osa.ciifen.org/> . <http://www.ciifen.org/>
- CONAGUA, 2008. Programa Nacional Hídrico 2007-2012. Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx>.
- CONAGUA, 2012. Comisión Nacional del Agua/ Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Organismo de Cuenca Pacífico Norte. Informes del estado de las presas.<http://www.conagua.gob.mx/OCPN07/Contenido/Documentos/PRESASgrpn.pdf>.
- CONAGUA, 2013. Comisión Nacional del Agua/ Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Organismo de Cuenca Pacífico Norte. Boletines de monitoreo, evaluación y pronóstico de sequías. (<http://www.conagua.gob.mx/ocpn/Contenido.aspx?n1=2&n2=5&n3=11>)
- CONAGUA, 2014. Comisión Nacional del Agua/ Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía, Consejos de Cuenca Ríos Presidio al San Pedro, Ríos Mocorito al Quelite y Fuerte al Sinaloa. <http://www.conagua.gob.mx/pronacose/Contenido.aspx?n1=7&n2=54>
- CONAGUA, 2016. High-Level Panel on Water – HLPWater, (Panel de Alto Nivel Sobre Agua), 21 de septiembre de 2016 (ONU).
- CONAGUA, 2017. Documentos internos de CONAGUA sobre la estimación de la vulnerabilidad a la sequía para el año 2016 en el OCPN.
- CONAGUA, 2012a. “Lineamientos que establecen los criterios y mecanismos para emitir acuerdos de carácter general en situaciones de emergencia por la ocurrencia de sequía, así como las medidas preventivas y de mitigación, que podrán implementar los usuarios de las aguas nacionales para lograr un uso eficiente del agua durante sequía”, en *Diario Oficial de la Federación*, 22 de noviembre. México.
- Cordery I., and M. McCall, 2000. A model for forecasting drought from teleconnections. *Water Resour. Res.*, 36, 763–768.

- CREAN, 2016. Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales, CONICET/UNC. Monitoreo de Sequías. <http://www.crean.unc.edu.ar/secciones/monitoreo>.
- CRED-UNISDR, 2016. Mortality trends from major disasters from 1996 to 2015. Poverty & Death: DISASTER MORTALITY.
- Crespo J. and Mora E., 1993. Drought estimation with neural networks. *Adv Engng Soft* 1993;18:167–70.
- Dawson C.W. and Wilby R. L., 2001. Hydrological modelling using artificial neural networks. *Progress in Physical Geography*, 25, 1, pp. 80-108.
- Department of Water Resources of Yunnan Province, (2011). 2010 bulletin of water resources in Yunnan Province, Kunming, Yunnan, China.
- Djerbouai S. & Souag-Gamane D., 2016. Drought Forecasting Using Neural Networks, Wavelet Neural Networks, and Stochastic Models: Case of the Algerois Basin in North Algeria. *Water Resour Manage* (2016) 30: 2445. doi:10.1007/s11269-016-1298-6.
- Dolling O.R. & E. Varas. 2002. Artificial neural networks for streamflow prediction. *J. Hydraul. Res.*, 40(5): 547-554.
- Domínguez J., 2016. Revisión de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia. ISSN 2007-2422. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. III, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 77-93.
- Douriet J.C., 2010. Caracterización y evaluación de escenarios por sequía en la cuenca y acuífero del río Culiacán. Tesis de Maestría. Consultada el 22/03/2013
- Douriet J.C., 2014. Pasantías en Aplicación de redes neuronales en índices de sequías, Caso de Estudio: Organismo de Cuenca Pacífico Norte. Posgrado de la Facultad de Agronomía de la UNC.
- Douriet J.C., 2015. Pasantías en Validación de redes neuronales en índices de sequías, Caso de Estudio: Organismo de Cuenca Pacífico Norte. Posgrado de la Facultad de Agronomía de la UNC.
- Dracup T.A., Lee K.S., Paulson E.G. Jr., 1980. On the definition of droughts. *Water Resources Research* 16 (2), pp. 297-302.
- EDO, 2016. <http://edo.jrc.ec.europa.eu/scado/php/index.php?id=3120>

- EEA, 1999. Sustainable water use in Europe. Part 1. Sectoral use of water. Environmental Assessment Report No 1, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.
- Escalante-Sandoval C. y Reyes-Chávez L. *Técnicas Estadísticas en Hidrología*, Capítulo 8: Análisis regional hidrológico, pp. 157-202 y Apéndice A, pp. 291-298, México DF, Facultad de Ingeniería de la UNAM, 2002, 298 p.
- EurAqua, 2004. Towards a European Drought Policy. Discussion Document Prepared by the EurAqua Network of Europe's Leading Freshwater Research Organisations. <http://www.euraqua.org>.
- Florescano E. (2000). Breve historia de la sequía en México (2ª ed.). México, DF: Consejo Nacional para Cultura y las Artes.
- García-Acosta V. (julio-diciembre, 1993). Las sequías históricas de México: desastres y sociedad. Revista semestral de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, 1(1), 5-185.
- Gosain A.K., Rao S., Basuray D., 2006. Climate change impact assessment on hydrology of Indian River basins. *Current Science* 90 (3), 346–353.
- Gosling R., 2014. Assessing the impact of projected climate change on drought vulnerability in Scotland. *Hydrol. Res.* 45 (6), 806–816. <http://dx.doi.org/10.2166/nh.2014.148>.
- Govindaraju R.S. and Ramachandra R., A. editors, 2000. Artificial neural networks in hydrology. Dordrecht: Kluwer Academic.
- Guo H., Hu Q., Jiang T., 2008. Annual and seasonal streamflow responses to Climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin. *China. J. Hydrol.* 355 (1–4), 106–122.
- Guttman N.B., 1999. Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association* 35 (2), 311–322.
- Hagman G., 1984. Prevention Better than Cure: Report on Human and Natural Disasters in the Third World. Swedish Red Cross, Stockholm.
- Hayes M., M. Svoboda D. Le Comte K.T. Redmond and P. Pasteris, 2005. Drought monitoring: New tools for the 21st century. *Drought and Water Crises: Science, Technology and Management Issues*, D. A. Wilhite Ed., Taylor and Francis, 53–70.
- Hayes M.J., M. Svoboda D., Wilhite D.A., Vanyarkho O., 1999. Monitoring the drought 1996 using the standardized precipitation Index. *Bulletin of American Meteorological Society* 80 (3), 429–438.

- Haykin S., 1994. *Neural Networks: a Comprehensive Foundation*. MacMillan, New York.
- Heddinghaus T. R., and P. Sabol, 1991. A review of the Palmer Drought Severity Index and where do we go from here? *Proc. Seventh Conf. on Applied Climatology*, Salt Lake City, UT, Amer. Meteor. Soc., 242–246.
- Heim R.R., 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83 (8), 1149–1166.
- Heppenstal A.J., See L.M., Abrahart R.J., Dawson C.W., 2008. *Neural Network Hydrological Modelling: An Evolutionary Approach*. Cap 23 de Water Science and Technology Library. *Practical Hidroinformatics, Computational Intellingence and Technological Developments in Water Applications*. ISBN 9783540798811 (online) • 9783540798804. DOI 10.1007/978-3-540-79881-1\_23.
- Herrera Q. J., Yari Y., Luque E., Túpac V.Y., 2013. Red Neuronal aplicada a la generación de caudales mensuales estocásticos. *Proceedings del XII Congreso de la Sociedad Peruana de Computación*.
- Hisdal H., and Tallaksen L.M., 2003. *Journal of Hydrology* 281, 2003. pp. 230-247.
- House P.L.A., & Chang H., 2011. Urban water demand modeling: Review of concepts, methods, and organizing principles. *Water Resources Research*, 47.
- Hsu K.L., Gupta H.V., y Sorooshian S., 1995. Artificial neural-network modeling of the rainfall-runoff process. *Water Resources Research*, 31(10), 2517–2530.
- <http://drought.unl.edu/dm>.
- <http://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/current>
- <http://land.copernicus.eu/global/products/swi>.
- [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/Soilmst\\_Monitoring/US/Soilmst/Soilmst.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/Soilmst_Monitoring/US/Soilmst/Soilmst.shtml).
- <http://www.esa-soilmoisture-cci.org/node/145>.
- <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.cpcsoil.html>.
- [http://www.lapismet.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=74&Itemid=103](http://www.lapismet.com/index.php?option=com_content&view=article&id=74&Itemid=103).
- [http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcasp/documents/WMO\\_ElNino\\_Nov1997.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcasp/documents/WMO_ElNino_Nov1997.pdf)
- <https://public.wmo.int/es/acerca-de-la-omm/miembros>
- <http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcasp/RCCs.html>
- [http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcasp/enso\\_updates.html](http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcasp/enso_updates.html)
- <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>

<http://www.neurosolutions.com>.

Hu T.S., Lam K.C. and Thomas S.N., (2005) A Modified Neural Network for Improving River Flow Prediction. *Hydrological Sciences Journal*, 50:2, -318, DOI: 10.1623/hysj.50.2.299.61794. <http://www.tandfonline.com/loi/thsj20>.

Hu T.S., Lam K.C., and Thomas S.N., (2014). A Modified Neural Network for Improving River Flow Prediction. *Hydrological Sciences Journal*. 50:2, -318, DOI: 10.1623/hysj.50.2.299.61794; <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.50.2.299.61794>.

Hyun S. and Salas J. D., 2000. Regional drought analysis based on neural networks. *J. of Hydrologic Engineering* 5(2):145-155.

ICD, 2015. International Conference on Drought. Research and Science-Policy Interfacing. 10-13 March 2015, Valencia, Spain.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), (2013). TerraMa2 Monitoreo Análisis y Alerta. Manual de Instalación.

Internacional Research Institute for Climate and Society (IRIS), 2016. IRI ENSO Forecast. <http://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/current>.

Jaeger H., Haas H., 2004. Harnessing nonlinearity: predicting chaotic systems and saving energy in wireless communication. *Science* 304 (5667), 78–80.

Jiang T., Shi Y.F., 2003. Global warming and its consequences in Yangtze River floods and damages. *Adv. Earth Sci.* 18, 277–284 (in Chinese with English abstract).

Jothiprakash V., Magar R.B., 2012. Multi-time-step ahead daily and hourly intermittent reservoir inflow prediction by artificial intelligent techniques using lumped and distributed data. *J. Hydrol.* 450–451, 293–307.

Kao S.C., Govindaraju R.S., 2010. A copula-based joint deficit index for droughts. *J. Hydrol.* 380, 121–134. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.029>.

Karl T.R., 1986. The sensitivity of the Palmer drought severity index and Palmer's Zindex to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. *J. Appl. Meteorol.* 25 (1), 77–86. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1986\)025%3C0077:TSOTPD%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025%3C0077:TSOTPD%3E2.0.CO;2).

Karl T.R., Quinlan F., Ezell D.S., 1987. Drought termination and amelioration: its climatological probability. *J. Appl. Meteorol.* 26 (9), 1198–1209. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1987\)026%3C1198:DTAAIC%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1987)026%3C1198:DTAAIC%3E2.0.CO;2).

- Karunasinghe D.S.K., Liong S.Y., 2006. Chaotic time series prediction with a global model: artificial neural network. *Journal of Hydrology* 323, 92–105.
- Keshavarz M., Karami E., Vanclay F., 2013. The social experience of drought in rural Iran. *Journal of Land Use Policy* 30, 120–129.
- Kim T.W., Valdés J.B. and Aparicio J. 2002. Frequency and Spatial Characteristics of Droughts in the Conchos River Basin, Mexico. *Water International*: 27 (3): 420–430.
- Kim S., Kim H.S., 2008. Neural networks and genetic algorithm approach for nonlinear evaporation and evapotranspiration modeling. *Journal of Hydrology* 351, 299–317.
- Kim T.W., and Valdes J.B., 2003: Nonlinear model for drought forecasting based on a conjunction of wavelet transforms and neural networks. *J. Hydrol. Eng.*, 8, 319–328.
- Krose B.J.A.; Van der Smagt P.P., 1993. *An Introduction to Neural Networks*. Quinta edición. eighth edition. University of Amsterdam, 1996.
- Kuenzer C., Bartalis Z., Schmidt M., Zhaoa D., Wagner W., 2008. TREND analyzes of a global soil moisture time series derived from ERS-1/-2 scatterometer data: floods, droughts and long term changes. *The International Archives of the Pho-togrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVII (PartB7) (Beijing, China)*.
- Landa R., Magaña V. and Neri C., 2008. *Agua y Clima: elementos para la adaptación al cambio climatico*. [www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx). ISBN: 978-968-817-887-4.
- Li X.H., Zhang Q., Xu C-Y, Ye X.C., 2015. The changing patterns of floods in Poyang Lake, China: characteristics and explanations. *Nat. Hazards* (in press). <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-014-1509-5>.
- Linsley R.K., Kohler M.A., Paulus J.L.H., 1977. *Hidrología para ingenieros*. Editorial McGraw-Hill Latinoamérica. Segunda Edición.
- Loke E., Warnaars E.A., Jacobsen P., Nelen F., do Céu Almeida M., 1997. Artificial neural networks as a tool in urban storm drainage. *Water Sci. Technol.* 36, 101-109.
- Ma M., Ren L., Yuan F., Jiang S., Liu Y., Kong, H., Gong, L., in press (2015). A new standardized Palmer drought index for hydro-meteorological use. *Hydrol. Process.* doi: <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10063>.
- Ma M., Song S., Ren L., Jiang S., Song, J., 2013. Multivariate drought characteristics using trivariate Gaussian and Student t copulas. *Hydrol. Process.* 27 (8), 1175– 1190. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8432>.

- Magaña V. (Editor) (2004). *Los impactos del niño en México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación. México, 229 p. [http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/libros/el\\_nino/](http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/libros/el_nino/).
- Magaña V, and A. Quintanar, 1997: On the use of a general circulation model to study regional climate. 2nd. UNAM-CRAY Supercomputing Conference on Earth Sciences. Mexico City. June 1997. Ed. Cambridge University Press. 39-48
- Magaña V, 2015. Una metodología para generar información de sequía meteorológica. Agropecuaria e hidrológica. Proyecto CONACYT-INEGI 209932 (2014-2016). Instituto de Geografía. UNAM. [http://www.inegi.org.mx/eventos/2015/conacyt/doc/p\\_MaganaSequia.pdf](http://www.inegi.org.mx/eventos/2015/conacyt/doc/p_MaganaSequia.pdf).
- Magaña V, 1999. Los impactos de “El Niño” en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM, Dirección General de Protección Civil, Secretaría de Gobernación, México. 229 pp.
- Magaña V, 2004. El cambio climático global: comprender el problema. En: Martínez, J. y A. Fernández (comps.). Cambio climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. P. 17-27.
- Magaña V, 2005. Elaboración de escenarios climatológicos para la región de México, Centroamérica y Cuba. Informe de avance de trabajo. Proyecto “Fomento de capacidades para la etapa II de adaptación al cambio climático en Centroamérica, México y Cuba”. UNAM, INE, PNUD-GEF. Octubre del 2005. México.
- Magaña V., J. Vázquez J.L., Pérez y J. Pérez, 1998. Impact of El Niño on precipitation in México. *Geofísica Internacional*. Vol. 42. Num. 3. p. 313 – 330.
- Magaña V., Landa R., and Neri C, (2008). Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático. SEMARNAT. [www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx). ISBN: 978-968-817-887-4.
- Maier H.R., Jain A., Dandy G.C., and Sudheer K.P., 2010. "Methods used for the development of neural networks for the prediction of water resource variables in river systems: Current status and future directions." *Environmental Modelling & Software*, 25(8), 891-909. 2010.
- Maier H.R., Dandy G.C., 1996. The use of artificial networks for the prediction of water quality parameters. *Water Resour. Res.* 32, 1013-1022.



- Makwana J.J. & Tiwari M.K., 2014. Intermittent Streamflow Forecasting and Extreme Event Modelling using Wavelet based Artificial Neural Networks. *Water Resour Manage.* 28: 4857. doi:10.1007/s11269-014-0781-1.
- Marcos O. 2001. Sequía: definiciones, tipología y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, 26: 59-80. Obtenido en <http://redalyc.uaemex.mx>
- May R.J., Maier H. R., and Dandy G.C., 2010. "Data splitting for artificial neural networks using SOM-based stratified sampling." *Neural Networks*, 23(2), 283-294. 2010.
- Maybank J., Bonsal B.R., Jones K., Lawford R.G., O'Brien E.G., Ripley E.A., Wheaton E., 1995. Drought as a natural disaster. *Atmos. Ocean* 33, 195-222.
- McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA. American Meteorological Society, Boston, MA, pp. 179–184.
- Mendicino G., A. Senatore and P. Versace, 2008: A groundwater resource index for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *J. Hydrol.*, 357, 282–302.
- Miguel R.A., Torrecillas N.C.E. y Ravelo A.C., 2015. Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía para las Ciudades de Mazatlan y Culiacan, Sinaloa, y LA Ciudad de Victoria de Durango, Durango. Version 1 y 2. [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx).
- Ministerio de Medio Ambiente de España (MMAE), 2005. Guía para la redacción de planes especiales de actuación en situación de alerta y eventual sequía. Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General del Agua. Madrid.
- Minsky M.L. and Papert S.A. 1969. *Perceptrons*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Mishra A.K, Desai V.R., Singh V.P., 2007. Drought forecasting using a hybrid stochastic and neural network model. *J Hydrol Eng ASCE* 12(6):626–638.
- Mishra A.K., and V. P. Singh, 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*. 391 (1–2), 202–216.
- Mishra A.K., and V.P. Singh, 2011. Drought modeling—A review. *Journal of Hydrology*. 403, 157–175. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.03.049.
- Mishra A.K., and V.R. Desai, 2005. Drought forecasting using stochastic models. *Stochastic Environ. Res. Risk Assess*, 19, 326–339.

- Mittal P., Chowdhury S., Roy S., Bhatia N., Srivastav R., 2012. Dual Artificial Neural Network for Rainfall-Runoff Forecasting. *Journal of Water Resource and Protection*, 2012, 4, 1024-1028. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2012.412118>.
- Mittal P., Chowdhury S., Roy S., Bhatia N., and Srivastav, (2012). Dual Artificial Network for Rainfall-Runoff Forecasting. *Journal of Water Resource and Protection*. 4, 1024-1028. SMBS, Vellore Institute of Technology, Vellore, India. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2012.412118>.
- Mo K.C., Schemm J.K.E., and Yoo S.H. Yoo, 2009. Influence of ENSO and the Atlantic multidecadal oscillation on drought over the United States. *J. Climate*, 22, 5962–5982.
- Moradi H.R., Erfanzadeh R., 2001. Investigation of droughts trend in Haraz River Watershed, pp. 283–292.
- Morid S., V. Smakhtin and K. Bagherzadeh, 2007: Drought forecasting using artificial neural networks and time series of drought indices. *Int. J. Climatol.*, 27, 2103–2111.
- Moss R.H., Nakicenovic N., O'Neill B., 2008. This report summarizes the findings and recommendations from the **IPCC** Expert Meeting on New Scenarios in Noordwijkerhout, The Netherlands, 19-21 September 2007 IPCC.
- Mutlu E., Chaubey I., Hexmoor H. and Bajwa S.G., (2008). Comparison of artificial neural network models for hydrologic predictions at multiple gauging stations in an agricultural watershed. *Hydrological Processes*. ([www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)) DOI: 10.1002/hyp.7136.
- Nair A.S., Jyh-Charn L., Rilett L., Gupta S., 2001. Non-linear analysis of traffic flow. *Proc. IEEE Conf. Intell. Trans. Syst.*, Oakland, CA, pp. 681–685.
- Nalbantis I., 2008. Evaluation of a Hydrological Drought Index. *European Water* 23/24: pp. 67-77.
- National Drought Mitigation Center (NDMC), 2016. What is drought? National Drought Mitigation Center. <http://drought.unl.edu/whatis/what.htm>.
- NDMC, 2007. National drought mitigation center university of Nebraska, Lincoln, USA, Online <http://www.drought.unl.edu/> accessed Jan 2008.
- Nicholls N., 1985: Towards the prediction of major Australian droughts. *Aust. Meteor. Mag.*, 33, 161–166.

- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2017. Strong El Niño sets stage for 2015-2016 winter weather. [www.noaanews.noaa.gov](http://www.noaanews.noaa.gov).
- North American Drought Monitor (NADM) Workshop, 2016. <https://www.drought.gov/nadm/content/2016-nadm-workshop>.
- NSTC, 2005: Grand challenges for disaster reduction. National Science and Technology Council Rep., 25 pp. [Available online at <http://www.sdr.gov/docs/SDRGrandChallengesforDisasterReduction.pdf>].
- Obasi G.O.P., 1994. WMO's role in the international decade for natural disaster reduction, Bull. Am. Meteorol. Soc. 75(1), 655-1661.
- OCPN, 2013. Documentos internos de la Dirección Técnica del OCPN, relativos al boletín hidrometeorológico y evolución del almacenamiento de las presas. 365 paginas.
- OCPN, 2017. Documentos internos del OCPN sobre Planes de Riego de los años 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013, 2013-2014, 2014-2015, 2015-2016 y 2016-2017 del Distrito de Riego #010 Culiacán-Humaya.
- OFDA/CRED, 2016. EM.Dat., <http://www.cred.be/emdat/intro.html> (Access date: Nov 28, 2016).
- OMM, 1997. El Niño Update.
- OMM, 2014. El Niño/Southern Oscillation. WMO-No. 1145. ISBN 978-63-111145-6
- Organismo de Cuenca Pacifico Norte (OCPN), 2006. Programa Hidráulico Regional 2007-2012. OCPN-CONAGUA. Imprenta de oficina de gobierno.
- Ortega, 2016. Documentos internos de IMTA-CONAGUA. Estimación de la Vulnerabilidad a la Sequía. Curso de preparación para estimar la vulnerabilidad a la sequía en municipios, cuencas y Consejos de Cuenca en la República Mexicana.
- Palmer W.C., 1965. Meteorological droughts. U.S. Department of Commerce Weather Bureau Research Paper 45, 58 pp.
- Pandey S., Bhandari H., Ding S., Prapertchob P., Sharan R., Naik D., Taunk S.K., Sastri A., 2007. Coping with in rice farming in Asia: insights from a cross-country comparative study. International Rice Research Institute (IRRI).
- Panu U.S., and T.C. Sharma, 2002: Challenges in drought research: Some perspectives and future directions. Hydrol. Sci., 47, S19–S30.

- Paulo A.A., Ferreira E., Coelho C., Pereira L.S., 2005. Drought class transition analysis through Markov and Log linear models, an approach to early warning. *Agriculture Water Management* 77, 59–81.
- Pierini J.O., Gómez E. A. and Telesca L., (2012). Prediction of water flows in Colorado River, Argentina. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 40(4): 872-880. DOI: 103856/vol40-issue4-fulltext-5.
- Planchuelo A.M. 2015. Incidencia de las sequías en la agricultura y la vulnerabilidad hídrica de los cultivos. 36 pp. Ilust. Edt. CREAN. [http://www.crean.unc.edu.ar/secciones/monitoreo/monitoreo\\_intro.html](http://www.crean.unc.edu.ar/secciones/monitoreo/monitoreo_intro.html).
- Portela M.M., Santos J.F., Silva A.T., Benítez J.B., Frank C., Reichert S.M., 2015. Drought analysis in southern Paraguay, Brazil and northern Argentina: regionalization, occurrence rate and rainfall thresholds. *Hydrol. Res.* (in press), <http://dx.doi.org/10.2166/nh.2014.074>.
- Pouliotte J., Smit B., Westerhoff L., 2009. Adaptation and development: livelihoods and climate change in Subarnabad, Bangladesh. *Climate and Development* 1 (1), 31–46.
- Qiu J., 2010. China drought highlights future climate threats. *Nature*, 465(7295), 142–143.
- Quispe J.H., Yari Y., Luque E. and Valdivia Y.J.T., (2013). Red Neuronal aplicada a la generación de caudales estocásticos. *Proceedings del XII Congreso de la Sociedad Peruana de Computación*.
- Rahmat S.N., Jayasuriya N., Bhuiyan M., 2015. Assessing droughts using meteorological drought indices in Victoria, Australia. *Hydrol. Res.* (in press), <http://dx.doi.org/10.2166/nh.2014.105>.
- Raman H., Sunilkumar R., 1995. Multivariate modelling of water resources time series using artificial neural networks. *J. Hydrol. Sci.* 40, 145-163.
- Ravelo A.C., Douriet C.J.C., Sanz R.R. and Ramírez A.I., 2015. Assessing Drought Vulnerability and Risk in Sinaloa, México. *Conferencia sobre las sequías*. Valencia, España. ICD 2015.
- Ravelo A.C., Planchuelo A.M., Aroche R., Douriet C.J.C., Hallack A.M., Jimenez R., Maureira H., Peña P.T., Tiscornia G., Zamvettor R., and Zimmermann R., 2016. Monitoreo y Evaluación de las Sequías en América Central, Estudio de Caso: Corredor seco de El Salvador, Honduras y Nicaragua. *Serie de Estudios Temáticos EUROCLIMA-acción en desertificación, degradación de tierras y sequías (DDTS)*.

- Reporte Técnico del Joint Research Centre de European Commission. JRC Science Hub, <https://ec.europa.eu/jrc>. JRC102117, EUR27974ES. ISBN9789279594106.
- Ravelo A.C., 2009. Desarrollo de un Sistema Operativo para el Monitoreo, Evaluación y Pronóstico de Sequías (SOS) en el ámbito del Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN/CNA), Área de estudio: Cuenca del río Culiacán. Informe OMM/PREMIA No. GINT 01/2009. OMM-CONAGUA.
- Ravelo A.C., 2010. Sistema Operativo para el Monitoreo, Evaluación y Pronóstico de Sequías en la Cuenca del río Culiacán. Asistencia Técnica Especializada para el Desarrollo de Planes de Atención de Sequías. Informe OMM/PREMIA No. GINT 01/2010. OMM-CONAGUA.
- Ravelo A.C., 2011. Sistema Operativo para el Monitoreo, Evaluación y Pronóstico de Sequías en la Cuenca del río Culiacán. Asistencia Técnica Especializada para el Desarrollo de Planes de Atención de Sequías. Informe OMM/PREMIA No. GINT 01/2011. OMM-CONAGUA.
- Ravelo A.C., 2012. Monitoreo, Pronóstico y Evaluación de Riesgo por Sequía Hidrológica en la RH10 el OCPN; Utilización de información satelital en el monitoreo de las sequías. Informe OMM/PREMIA No. GINT 01/2012. OMM-CONAGUA.. 85 págs.
- Ravelo A.C.; Planchuelo A.M.; Zanvetor R.E.; Boletta, P.E.C., 2016. Sistema de monitoreo y evaluación de las sequías en Argentina. Agrometeoros, Passo Fundo, v.24, n.1, p.113-120.
- Ravelo A.C., 2007. Monitoreo, evaluación y pronóstico de sequías en el OCPN. Proyecto PREMIA CONAGUA. Informe OMM/PREMIA No. GINT 01/2007. OMM-CONAGUA.
- Ravelo A.C., 2008. Desarrollo de un Sistema Operativo para el Monitoreo, Evaluación y Pronóstico de Sequías (SOS) en el ámbito del Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN/CNA), Área de estudio: Cuenca del río Culiacán. Informe OMM/PREMIA No. GINT 02/2008. OMM-CONAGUA.
- Ravelo A.C., 2012. Informes Finales del Proyecto PREMIA. OMM- CONAGUA. <https://sites.google.com/a/wmo.int/mex/system/app/pages/search?scope=searchsite&q=ravelo>.

- Ravelo A.C., A.M. Planchuelo & M.Cherlet., 2004. Monitoring land cover and drought occurrence along an ecological gradient in Argentina. SPOT Vegetation Meeting. Bélgica.
- Ravelo A.C., Douriet, J.C., 2014. Determinación de la Vulnerabilidad y el Riesgo de Sequías en Sinaloa, México. En el International Expert Symposium en Santiago de Chile “Coping with Droughts” ‘Building a Community of Practice on Drought Management Tools’.
- Ravelo A.C., Sanz R. & Douriet J.C., 2014. Detección, evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte, México. *Agriscientia* 31(1):11-24.
- Rezaeian-Zadeh M. and Tabari H., 2012. MLP-based drought forecasting in different climatic regions. *Theor Appl Climatol* (2012), 109, pp. 407-414.
- Rossi G., 2003. Requisites for a drought watch system. In: Rossi, G. et al. (Eds.), *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions*. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, pp. 147–157.
- Rossi G., Castiglione L., Bonaccorso B., 2007. Guidelines for planning and implementing drought mitigation measures. In: Rossi, G., Vega, T., Bonaccorso, B. (Eds.), *Methods and Tools for Drought Analysis and Management*. Water Science and Technology Library, Springer, Netherlands, pp. 325–347.
- Sahoo G.B., Ray C., 2006. Flow forecasting for a Hawaii stream using rating curves and neural networks. *Journal of Hydrology* 317, 63–80.
- Sajikumar N., Thandaveswara B.S., 1999. A non-linear rainfall–runoff model using an artificial neural network. *Journal of Hydrology* 216, 32–55.
- Sanz R.R.; Douriet C. J.C., Ravelo A. y Ornelas S.V.J., 2012. Monitoreo de la sequía 2011-2012 en la RH10-OCPN. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. [http://www.revistatlaloc.org.mx/amh\\_congreso/articulos/CambioClimaticoyEventosExtremos/021Art\\_rsr1.pdf](http://www.revistatlaloc.org.mx/amh_congreso/articulos/CambioClimaticoyEventosExtremos/021Art_rsr1.pdf)> Consultada el 22/11/2013.
- Sattari T., Yurekli K., and Pal M., 2012. Performance evaluation of artificial neural network approaches in forecasting reservoir inflow. *Applied Mathematical Modelling*, 36. 2649–2657.

- SCADO 2013. Factsheets of SCADO Indicators. Vegetation Productivity Anomaly (FAPAR Anomaly). : South-Central American Drought Observatory.. Joint Research Center. *scado.jrc.ec.europa.eu/.../factsheets/factsheet\_fapar.pdf* 6 pp.
- SEMARNAT, 2010. Decreto por el que se ordena a la Comisión Nacional del Agua establecer las medidas de prevención y control de los efectos provocados por fenómenos meteorológicos extraordinarios y se instruye a las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal a coordinarse y brindar todos los apoyos necesarios a dicha Comisión. *Diario Oficial de la Federación*, 9 de septiembre. México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5158514&fecha=09/09/2010&print=true](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5158514&fecha=09/09/2010&print=true).
- SEMARNAT, 2012a. Acuerdo por el que se instruyen acciones para mitigar los efectos de la sequía que atraviesan diversas entidades federativas. *Diario Oficial de la Federación*, 25 de enero. México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5231010&fecha=25/01/2012](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5231010&fecha=25/01/2012).
- SEMARNAT, 2012b. Lineamientos que establecen los criterios y mecanismos para emitir acuerdos de carácter general en situaciones de emergencia por la ocurrencia de sequía, así como las medidas preventivas y de mitigación, que podrán implementar los usuarios de las aguas nacionales para lograr un uso eficiente del agua durante sequía. *Diario Oficial de la Federación*, 22 de noviembre. México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5278695](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5278695).
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN), 2016. El uso correcto de términos climáticos. XXX Foro de Perspectivas Climáticas en la República Mexicana y VI Encuentro de Servicios Climáticos, Gerencia de Meteorología y Climatología. CONAGUA. Consultor Oscar Sánchez M.,
- Shamseldin A.Y., O'Connor K.M., Liang G.C., 1997. Methods for combining the outputs of different rainfall-runoff models. *J. Hydrol.* 197, 203±229.
- Shankman D., Heim B.D., Song J., 2006. Flood frequency in China's Poyang Lake region: trends and teleconnections. *Int. J. Climatol.* 26, 1255–1266.

- Shin H. and Salas J., 2000. "Regional Drought Analysis Based on Neural Networks." *J. Hydrol. Eng.*, 10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:2(145), 145-155.
- Smith M., 1996: *Neural Networks for Statistical Modeling*. International Thompson Computer Press, 235 pp.
- Sun A.Y., 2013. Predicting groundwater level changes using GRACE data. *Water Resources Research*, 49(9), 5900–5912.
- Svoboda M., and Coauthors, 2002. The Drought Monitor. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1181–1190.
- Szalai S., Bella S.Z., 2004. SPI index for monitoring of drought development in 2003. *EMS Annual Meeting Abstracts (1)*, p. 258.
- Tallaksen I.M., van Lanen, H.A.J. (Eds.), 2004. *Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Developments in Water Sciences 48. Elsevier B.V., The Netherlands.
- Torrecillas N., Miguel A. and Ravelo A., (2015). PMPMS 2015. Actualización de los Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de Sequías de los Consejos de Cuenca de los ríos Fuerte y Sinaloa, Mocorito al Quelite y Presidio al San Pedro. [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx).
- Torrecillas N., Miguel A. Ravelo A., (2013). PMPMS 2013. Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de Sequías de los Consejos de Cuenca de los ríos Fuerte y Sinaloa, Mocorito al Quelite y Presidio al San Pedro. [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx).
- Torrecillas N., Ravelo A.C., Miguel A., (2015). Proyecto de Coordinación del PMPMS del Consejo de Cuenca de los Ríos Presidio al San Pedro. OCPN-CONAGUA.
- Tsakiris G., Vangelis H., 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *Eur. Water* 9–10, 3–11.
- UE, 2017. <http://edo.jrc.ec.europa.eu/scado/php/index.php?id=3000>.
- UNESCO, 2014. International Expert Symposium “Coping with Droughts”. Santiago de Chile. <http://en.unesco.org/events/international-expert-symposium-“Coping-droughts”>.
- USDA, 1994. Major World crop areas and climatic profile, World Agricultural Outlook Board, US department of Agriculture, Agricultural Handbook No.664, PP.157-170.



- Valiente O. (2001). “*Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación*”. *Investigaciones Geográficas*, 26, 59-80.
- Vasiliades L., and A. Loukas, 2008. Meteorological drought forecasting models. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, Abstract EGU2008-A-08458. [Available online at <http://cosis.net/abstracts/EGU2008/08458/EGU2008-A-08458.pdf>.]
- Velasco I., 2002. Plan de Preparación para Afrontar sequías en un Distrito de Riego. Tesis Doctoral. División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería. UNAM. Campus Cuernavaca Morelos. México.
- Vicario L., Garcia C.M. and Bertoni J.C., (2014). Evaluación de un índice para cuantificar sequías hidrológicas utilizando series sintéticas que incluyen variaciones temporales generadas por distintos procesos. Congreso Internacional Hidrollanuras 2014, Santa Fe, Argentina. 1-9 páginas.
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Clim.* 23 (7), 1696–1718.
- Vicente-Serrano S.M., Carlos González-Hidalgo J., de Luis M., Raventos J., 2004. Drought patterns in the Mediterranean area, the Valencia region (eastern Spain). *Climate Research* 26, 5–15.
- Wilhite D.A., (Ed.), 2000. DROUGHT, A Global Assessment, vols. I and II, Routledge Hazards and Disasters Series, Routledge, London.
- Wilhite D.A., Glantz M.H., 1985. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International* 10 (3), pp. 111-120.
- WMO, 2017. [http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcasp/enso\\_updates.html](http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcasp/enso_updates.html)
- Yao Y., Liang S., Qin Q., Wang K., Zhao S., 2011. Monitoring global land Surface drought based on a hybrid evapotranspiration model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13 (3), 447–457.
- Zarghami M., Abdi A., Babaeian I., Hassanzadeh y Kanani. 2011. Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan, Iran. *Global and Planetary Change*, 78. 137–146.
- Zhang Q., Liu Y., Yang G., Zhang Z., 2011. Precipitation and hydrological variations and related associations with large-scale circulation in the Poyang Lake basin. China. *Hydrol. Process.* 25 (5), 740–751.

- Zhang Q., Stanley S.J., 1997. Forecasting raw-water quality parameters for the North Saskatchewan River by neural network modeling. *Water Res.* 31, 2340±2350.
- Zhang Z.X., Xu C.Y., Ying B., Hu J.J., Sun Z.H., 2012. Understanding the changing characteristics of droughts in Sudan and the corresponding components of the hydrologic cycle. *J. Hydrometeorol.* 13, 1520–1535, 0.1175/JHM-D-11-0109.1.
- Zhao M.S., Running S.W., 2010. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science* 329 (5994), 940–943.
- Zongxing L., He Y., Wang P., H., Theakstone W.H., An W., Wang X., Lu A., Zhang W., Cao W., 2012. Changes of daily climate extremes in southwestern China during 1961–2008. *Global and Planetary Change*, 80–81, 255–272. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.06.008>

## **ANEXOS**

### **ANEXO 1: REDES NEURONALES**

**Conceptos teóricos y definiciones básicas sobre tipos, estructuras y clasificación de las redes neuronales.**

#### **Estado del arte de redes neuronales**

Debido a la importancia de las Redes Neuronales Artificiales (RNA) en el desarrollo de este trabajo, se hace una breve descripción en cuanto a definición, conceptos fundamentales, funcionamiento, arquitectura, procesos de aprendizaje (entrenamiento y validación), factibilidad de aplicación y ejemplos (casos) de aplicación.

#### **Que son las Redes Neuronales Artificiales (RNA)**

Las Redes Neuronales (RN) son modelos matemáticos inspirados en sistemas biológicos, adaptados y simulados en computadoras convencionales (Bocco, *et al.*, 2012). Los elementos que las conforman se asemejan a las neuronas biológicas, (Wasserman, 1989).

Una Red Neuronal es un modelo matemático-computacional con un conjunto de propiedades específicas, como son la habilidad de adaptarse o aprender, generalizar u organizar la información, todo ello basado en un procesamiento eminentemente paralelo, (Kröse *et al.*,1993)

Las redes neuronales son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso de los animales. Se trata de un

sistema de interconexión de neuronas en una red que colabora en producir un estímulo de salida. El objetivo de una red neuronal es conseguir respuestas similares a las que es capaz de dar el cerebro que se caracterizan por su generalización y su robustez. La capacidad de aprendizaje adaptativo es una de las características más atractivas de redes neuronales. Esto es, aprenden a llevar a cabo ciertas tareas mediante un entrenamiento con ejemplos ilustrativos. Como las redes neuronales pueden aprender a diferenciar patrones mediante ejemplos y entrenamientos, no es necesario elaborar modelos a priori ni necesidad de especificar funciones de distribución de probabilidad (Ravelo, 2008).

En el proceso de aprendizaje, los enlaces ponderados de las neuronas se ajustan de manera que se obtengan ciertos resultados específicos. Una red neuronal no necesita un algoritmo para resolver un problema, ya que ella puede generar su propia distribución de pesos en los enlaces mediante el aprendizaje. Este proceso es realizado con series temporales de los índices de sequía de forma de lograr un sistema calibrado y validado para el pronóstico de la ocurrencia de sequías. La aplicación de redes neuronales a la predicción de la ocurrencia de sequías ha sido documentada en la bibliografía científica (Morid et al., 2007; Hyun-Suk and Salas, 2000).

## **Utilidad de las Redes Neuronales Artificiales (RNA)**

Las redes de neuronas permiten abordar problemas de: Predicción y Clasificación, (Bocco, *et al.*, 2013).

## **Casos (ejemplos) donde se aplican las RNA**

Su aplicación es muy variada y cada vez más abundante, entre estos temas de ejemplo, están:

- Reconocimiento de patrones: de voz, de formas, de tipos de cultivos, de presencia-ausencia de propiedades o rasgos, detección de bordes.

- Predicción de series de tiempo: variables climáticas, económicas, marketing, hidrología.
- Procesamiento de una señal.
- Aplicaciones financieras: predicción de existencias.
- Análisis Financiero;
- Procesado de Imágenes en el ámbito de la Medicina, Industria y Defensa;
- Diagnóstico Médico y Comercial;
- Robótica y Control;
- Clasificación de Datos provenientes de sensores;
- Compresión y Codificación de Información y otras aplicaciones.

## **Historia Breve**

A continuación se presenta una historia breve de las redes neuronales, adaptada de la información del Curso –Taller Redes Neuronales Artificiales, impartido por Mónica Bocco y Gustavo Ovando, en el mes de octubre de 2013, en el CREAN de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

1943: McCulloch and Pitts propusieron el modelo neuronal conocido como McCulloch-Pitts, en el artículo “A logical calculus of Ideas Imminent in Nervous Activity”.

1957 Rosenblatt introdujo una RN con una única capa simple que se conoce como el Perceptrón, el mayor trabajo en computación neuronal realizado hasta hoy. Fue diseñado originalmente para reconocimiento de patrones ópticos.

1969 Minsky and Papert en su texto “Perceptrons” demostraron las limitaciones del perceptrón de una única capa, momento en el cual se produjo un período en que esta metodología no presentó nuevos avances en investigación.

1986 Se desarrolló el algoritmo de aprendizaje “Back-Propagation” para un perceptrón multi-capas y se recomendó fuertemente el uso de esta metodología de modelación nuevamente.

2000s El poder de los soft computacionales permitió un uso generalizado de aplicaciones de las Redes Neuronales.

## Modelo básico y abstracto de funcionamiento de una RNA

### Estructura de una RNA

Una Red Neuronal Artificial (RNA) está conformada por tres capas:

- Capa de entrada
- Capa/s oculta/s
- Capa de salida

### Modelo básico de una RNA

A continuación se muestra un esquema básico de funcionamiento de una red neuronal artificial, adaptado del material del Curso –Taller Redes Neuronales Artificiales, (Bocco, *et al.*, 2013), Figura 1:

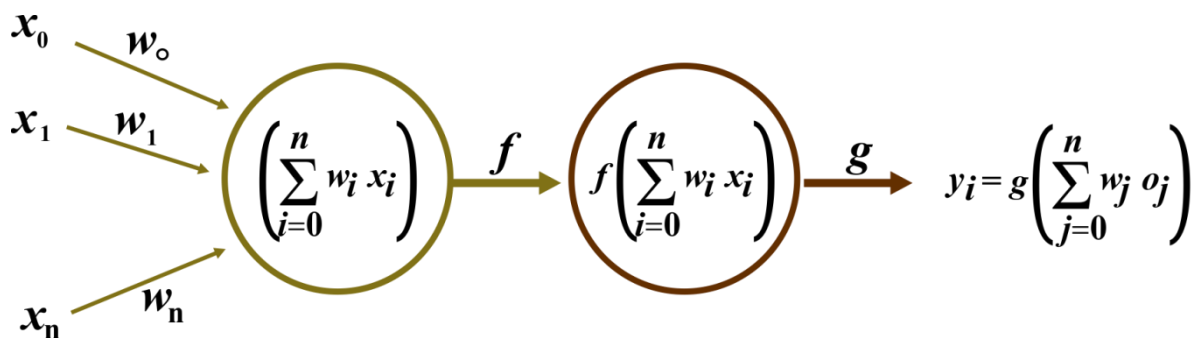


Figura 1: Esquema de funcionamiento de una RNA, adaptado de (Bocco, et al., 2013).

De la Figura 1,  $x_i$  son los valores de entrada,  $y_i$  son los valores de salida,  $f$  y  $g$  son las funciones de activación y los  $w_i$  son los pesos, asociados a cada variable de entrada.

**Las etapas para llevar a cabo una aplicación de redes neuronales, son:**

- Definición de su arquitectura
- Fase de Aprendizaje o Entrenamiento
- Fase de Validación

### Definición de la arquitectura general de una RNA

La arquitectura general de una Red Neuronal Artificial, tiene una organización y distribución de las neuronas, tal como se muestra en la Figura 2:

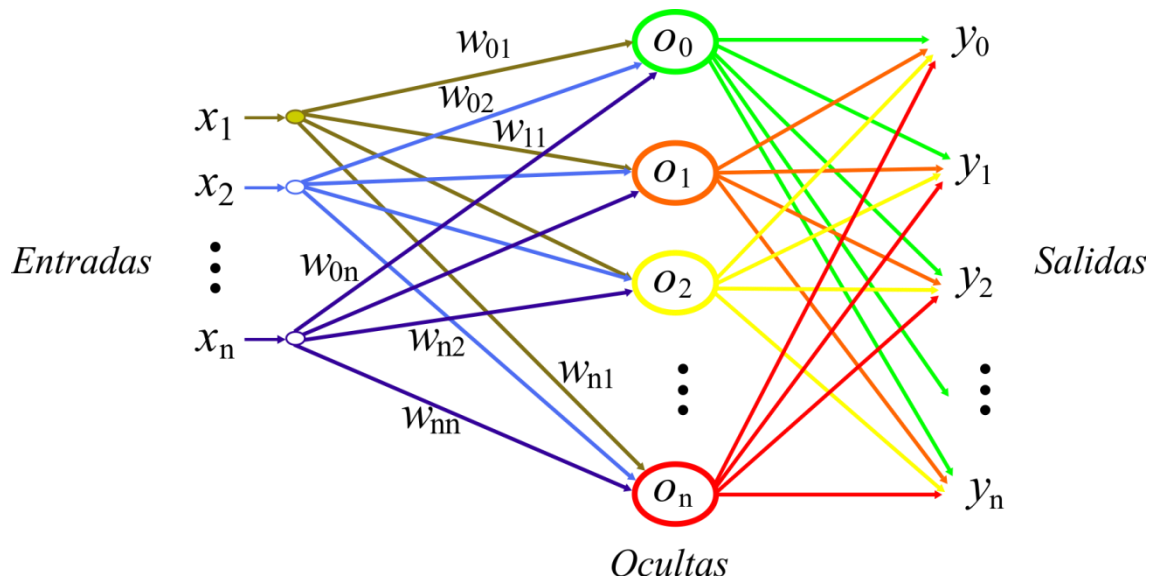


Figura 2: Arquitectura general de una RNA, adaptado de (Bocco *et al.*, 2013).

De acuerdo con la figura anterior, las variables de entrada al modelo son datos medidos o registrados, en este caso en estaciones climatológicas e hidrométricas, de variables como la precipitación o escurrimientos; o valores previamente estimados, como los índices meteorológicos (SPI, PDSI, NDVI), de escurrimiento (SDI) o índice de Estado (Ie).

A todas y cada una de las variables se le asigna un peso específico en su relación con cada una de las capas ocultas mediante una función de transferencia; los resultados o salidas de las capas ocultas se relacionan con todas y cada una de las variables de salida; estas variables de salida son los resultados esperados.

Existen diferentes tipos de arquitecturas de Redes Neuronales, entre las conocidas, están: Perceptron, Perceptron Multicapa (Multilayer Perceptron), Adaline, Redes Recurrentes (Red de Hopfield, Red Multicapa), Redes Competitivas (Red de Kohonen), Monocapa Feedforward, Multicapa Feedforward, Multicapa Feedforward Parcialmente Conectada, Generalized Feed Forward, Modular Neural Network, Jordan/Elman Network y Principal Component Analysis, entre otras; considerando diferentes funciones de transferencia (TanhAxon, SigmoidAxon, Linear T anhAxon) y Learning Rule (Step, Momentum, Conjugate Gradiente), considerando diferentes porcentajes de datos para su validación y entrenamiento; aplicando para ello el programa de Redes Neuronales NeuroSolutions ([www.neurosolutions.com](http://www.neurosolutions.com)).

### **Fase aprendizaje de las RNAs**

La principal característica importante de las RN es su capacidad para aprender de su ambiente, y mejorar su desempeño a través del aprendizaje, que se compone de las fases siguientes, (Bocco *et al.*, 2013):

Durante la fase de aprendizaje o entrenamiento de la RNA, se determinan iterativamente los pesos de las conexiones (neuronas de entrada con las de la capa oculta y entre la capa oculta y la de salida).

A partir de los datos de entrada la RN, en cada iteración, propaga una salida, con los pesos y función de activación considerado, esta salida se compara con la real, obteniéndose así un error.

Los tipos de aprendizaje de las Redes Neuronales, se dividen en No Adaptativo y Adaptativo; en el primer caso, se determina de antemano cual será el valor de los pesos y



en el segundo caso, no existe una forma para determinar de antemano los pesos, por lo que se necesita un proceso iterativo; también, se clasifica en aprendizaje supervisado y aprendizaje no supervisado. En el aprendizaje supervisado se presentan pares de patrones de entrada y salida deseada, (rasgos y clase a que pertenecen); estos pares constituyen el conjunto de entrenamiento. En el aprendizaje no supervisado se presentan un conjunto de objetos con su descripción incompleta, es decir se desconocen las clases en que se pueden agrupar.

La fase de aprendizaje o entrenamiento, concluye cuando la red es capaz de reproducir las salidas conocidas para los parámetros de entrada, con un error mínimo arbitrario o bien después de un número definido de iteraciones.

### **Fase de validación de las RNAs**

La fase de validación consiste en aplicar la red entrenada a otro conjunto de datos independientes para los cuales se conocen los resultados a fin de comprobar la eficiencia de la misma.

Los resultados obtenidos de aplicar redes neuronales a índices de sequía pueden presentarse en gráficos de coordenadas para series de cada localidad y en mapas para la presentación de resultados regionales sobre los pronósticos a distintos plazos. Debe destacarse que a medida que aumenta el plazo del pronóstico también aumenta el error cuadrático medio del pronóstico. Así un pronóstico a seis meses es menos preciso que uno a tres meses y, este es, a su vez, menos preciso que uno a un mes (Ravelo, 2008).

### **Alcance y limitaciones de las RNAs**

- Las RNA permiten modelar situaciones no lineales y aquellas en las cuales sus datos no responden necesariamente a una distribución estadística normal.
- Las RNA no son la solución de todos los problemas, son útiles para aquellos en los que "las reglas de solución" no son conocidas, y existen suficiente cantidad de datos que le permitan a la red aprender.

- Las RNA no explicitan como resuelven un problema. La representación interna generada puede ser demasiado compleja para ser analizada, aún en los casos más sencillos.

### **Resumen de los beneficios de las RNAs (Haykin, 1994).**

- Son sistemas no lineales.
- Son capaces de hacer un mapeo entre entradas y salidas.
- Son adaptables.
- Pueden dar información sobre la confiabilidad de sus respuestas.
- Pueden dar información sobre el “contexto” de la selección.
- Son tolerantes a fallas o faltas de datos.
- Son universales en cuanto a su análisis y diseño.
- Presentan analogías con los sistemas biológicos.

### **USO DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA)**

Debido a la importancia de las Redes Neuronales Artificiales (RNA) en el pronóstico de sequías, en esta sección se hace hincapié en cómo se aplican a los datos meteorológicos, hidrológicos e índices de sequías y al pronóstico de sequías meteorológicas e hidrológicas en las diferentes cuencas del Organismo de Cuenca Pacífico Norte.

No obstante conviene matizar la palabra Aplicaciones y diferenciar entre aplicaciones candidatas, aplicaciones en desarrollo y aplicaciones ya demostradas. Dicho de otro modo, es necesario puntualizar el estado de desarrollo, de realización y de comprobación de las redes neuronales utilizadas en cada aplicación. Las aplicaciones candidatas son aquellos problemas que en principio podrían ser resueltos con este tipo de tecnología que ofrecen las redes neuronales artificiales. Las aplicaciones en desarrollo son aquellas en las que se han realizado los estudios oportunos del problema y se dispone de un prototipo de red al que se le ha entrenado para resolver una versión simplificada del problema. Por último, las

aplicaciones demostradas son redes que de hecho ya están siendo utilizadas para resolver un problema real (Basogain; 2009).

## **Diseño de una red neuronal (RNA)**

Para el diseño de la red neuronal para resolver un problema concreto es conveniente disponer de programa de computación para el diseño de RNA. Con un programa de este tipo basta con pensar en términos de redes y no en programación de algoritmos en lenguajes de alto nivel. De esta manera todo el esfuerzo se debe dirigir al diseño de la arquitectura o estructura de la red y en la selección de los datos del conjunto de entrenamiento y de test (prueba), (Basogain; 2009).

Sobre la base en lo anterior, se construyó con el programa Neurosolution.xlsx la red para el pronóstico de sequías meteorológicas (Ravelo *et al.*, 2014) y con Neurosolutions.exe la red para el pronóstico de sequías hidrológicas, motivo de este trabajo de investigación; especificando el número de capas, de neuronas y los tipos de conexiones; definiendo los ficheros o conjuntos de datos de entrada y salida; eligiendo los parámetros de los cálculos internos de la red, seleccionando las diferentes funciones de transferencia y procesamiento de las neuronas, así como construyendo variaciones de los modelos estándar. La elección de la arquitectura, selección y preprocesado de los datos presentados a la red, es uno de los factores más influyentes en el éxito del diseño y realización de una red para una aplicación.

## **Fases de la aplicación de una RNA**

Las fases más importantes en la aplicación de los modelos de redes neuronales, como se menciona anteriormente, son: entrenamiento, prueba, validación, extensión o pronóstico (predicción) y evaluación de resultados, (Bocco *et al.*, 2013); la selección de la RNA depende si se va a predecir, asociar o clasificar; en este caso el tema es la predicción de series de índices de sequía meteorológica e hidrológica.

En la fase de entrenamiento se debe especificar el número de iteraciones y la planificación de los cambios de los parámetros de aprendizaje. Generalmente, esta fase requiere varias sesiones y la experimentación de diferentes parámetros de aprendizaje, diferentes vectores de entrada o diversas estrategias de entrenamiento que permiten obtener conclusiones definitivas para la solución más eficaz de una aplicación. El entrenamiento de la RNA para predicción son del tipo Supervisado (Basogain, 2009).

Entre los principales trabajos que han aportado al entendimiento, comprensión y aplicaciones de predicción, están los desarrollados por Basogain (2009, 1998) quién describe las principales RNA para pronóstico: Adaline y Madaline (1960), Digital Neural Network Architecture (DNNA) Networks (1990), Perceptron (1950), Back-Propagation (1985), Self Organizing Map (S.O.M.) (Kohonen, 1988); Smith (2003). Describe los principales algoritmos y arquitecturas de redes neuronales, entre ellas: El Perceptron Simple, la Back-Propagated Delta Rule Networks (BP) y Radial Basis function Networks (RBF); Kim *et al.*, (2002), quiénes aplican la red Multilayered Feed Forward Neural Network, basado su entrenamiento en la backpropagation, utilizada para el pronóstico de series de tiempo hidrológicas; Bocco *et al.*, (2007), clasifican datos de cobertura de suelo a partir de información proveniente de imágenes satelitales, aplicando los modelos de Redes Neuronales Perceptron Multicapa feed-forward; Bocco *et al.*, (2012), desarrollan modelos de RNA para estimar la evolución temporal de soybean coverage fraction desde imágenes MODIS y Landsat, con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) igual a 0.90 y 0.91, respectivamente.

En las siguientes secciones se describe la metodología para el pronóstico y el análisis temporal y espacial de las sequías meteorológicas e hidrológicas, mediante los pasos que se indican en la sección correspondiente:

### **Pronostico de índices de sequías meteorológicas e hidrológicas**

Para el monitoreo de las fases de la sequía y para efectos de planeación, elaboración de planes de mitigación e implementación de programas de mitigación de sequías, se hace necesario elaborar escenarios probables de ocurrencia de sequías; para ello se aplican los

programas de redes neuronales (Neurosolution, 2009), los cuales son métodos no paramétricos y trabajan a partir de una serie histórica de índices de sequía y datos hidroclimatológicos, con los cuales se entrena, aprende y se calibra, para posteriormente inferir los índices a 1, 2 o 3 meses siguientes, (Ravelo, 2009; Douriet, 2010; Ravelo *et al.*, 2014).

## **Pronósticos de sequías meteorológicas (RNAs Univariadas)**

En esta sección se describe la metodología para determinar escenarios de sequías meteorológicas a 1, 2 y 3 meses en el OCPN, mediante el análisis univariado temporal (pronóstico de índices de sequía) usando redes neuronales; utilizada en el Proyecto de Sequías del OCPN, (Douriet, 2010; Ravelo, 2012).

### **Aplicación del programa Neurosolutions a los índices de sequía estimados**

Para la aplicación del pronóstico de sequías meteorológicas, mediante el programa Neurosolutions.xlsx, se utilizó la metodología propuesta durante el desarrollo del Proyecto de Sequías en el Organismo de Cuenca Pacífico Norte, (Ravelo, 2007; Ravelo *et al.*, 2014).

Los datos utilizados son los índices mensuales de sequía (SPI, PDSI), para cada una de las 59 estaciones meteorológicas, estimados durante el monitoreo de sequías meteorológicas, para el período 1978-2013. Debido a que el pronóstico fue realizado con el uso de redes neuronales (Kim *et al.*, 2002; Ravelo, 2007) utilizando una sola variable de entrada y obteniendo una sola variable de salida, se tiene un pronóstico univariado de sequías meteorológicas, de entrenamiento supervisado.

Los pasos más importantes para la aplicación de las RNA en el pronóstico de sequías, mediante el programa Neurosolutions\_4, son:

- g) Desarrollar el archivo con los índices de sequía estimados para el monitoreo, en formato de Excel, que servirán de insumo al programa Neurosolutions for Excel
- h) Efectuar corridas de entrenamiento, prueba y validación, de acuerdo a las indicaciones del manual.

- i) Crear una nueva red neuronal (o abrir una existente) eligiendo el tipo de red (en este caso Multilayer perceptron, con 6 neuronas de entrada – son seis meses previos-, una capa oculta con cuatro neuronas y una capa de salida con una neurona – el índice a estimar).
- j) Guardar en archivo de computadora la red generada.
- k) Ejecutar el entrenamiento de la red.
- l) Llevar a cabo la validación (testing).

Posteriormente, para cada una de las series de índices pronosticados, realizar una evaluación del pronóstico de la sequía meteorológica mediante métodos estadísticos (Balzarini, 2011) y el uso de los Programas InfoStat ([www.infostat.com.ar](http://www.infostat.com.ar)) y Errores.xlsx (CREAN, 2013), determinando su grado de ajuste o de error (Dawson, 2001).

### **Pronostico de Sequías Hidrológicas (RNAs Multivariadas)**

En esta sección se desarrolla el pronóstico de sequías hidrológicas, en dos etapas; la primera de ellas, consiste en desarrollar una metodología para el análisis multivariado temporal y pronóstico de sequías hidrológicas, mediante el uso de redes neuronales, variables meteorológicas, volúmenes de escurrimiento e índices de sequía hidrológica (SDI) y la segunda etapa consiste en aplicar la metodología propuesta en el pronóstico de los volúmenes de escurrimiento y de ingreso a las presas (Q) y los índices de sequía hidrológica (SDI, Ie), a 1, 2 y 3 meses, para las principales corrientes y presas existentes en el OCPN.

#### **Desarrollo de un método para el Pronóstico de Sequías Hidrológicas**

35. Seleccionar la cuenca de estudio
36. Determinar la estación hidrométrica con registros históricos de escurrimientos y las estaciones climatológicas con influencia en la cuenca.
37. Conformar la base de datos climatológicos: Precipitación (P), Evaporación (EVP), Temperatura media (Tm), Temperatura Mínima (Tmin) y Temperatura Máxima (Tmax) e hidrométricos: Volúmenes de escurrimiento mensual (Vem), en formato Excel y la forma requerida por el softwares Neorosolution.exe

38. Estimar el índice de Escurrimiento de Sequías (SDI), usando los volúmenes de escurrimiento mensual de la estación hidrométrica o presa seleccionada.
39. Incluir en los formatos Excel de la base de datos el índice SDI, estimado en el punto anterior.
40. Convertir los registros de la base de datos del formato Excel a formato .CSV
41. Aplicar la función SENO de Excel a los meses del año.
42. Aplicar la función Aleatoria de Excel a la base de datos.
43. Seleccionar la Red Neuronal para el pronóstico de los volúmenes de escurrimiento mensual (Vem).
44. Localizar el archivo de datos en formato .CSV (puntos 6, 7 y 8)
45. Construir la Red de Neuronas seleccionando las variables de entrada: P, EVP, Tm, Tmin, Tmax y SDI, y las de salida: Q
46. Efectuar la validación cruzada y prueba de datos.
47. Seleccionar el número de capas ocultas
48. Seleccionar la función de Transferencia
49. Seleccionar el “Learning Rule”
50. Seleccionar el número máximo de iteraciones (Maximum Epochs)
51. Construir la configuración de prueba
52. Construir la Red Neuronal
53. Seleccionar los archivos de datos de ingreso y la variable de salida deseada
54. Llevar a cabo la Validación (Testing), exportando los resultados a un archivo de datos .txt.
55. Graficar los resultados de la Validación.
56. Estimar los errores de la Validación, por diferentes métodos.
57. Hacer el Pronóstico (Producción).
58. Exportar los resultados de la Producción a un archivo .txt)
59. Graficar los resultados del Pronóstico (Producción)
60. Estimar los errores producidos por el Pronóstico, mediante el Programa Errores.xlsx
61. Salvar y guardar la neurona con el mejor ajuste y con error aceptable.
62. Repetir el procedimiento con otras redes neuronales, de diferente tipo y estructura.

63. Comparar mediante métodos estadísticos el mejor ajuste o la mejor red neuronal que pueda representar el pronóstico de los escurrimientos futuros conforme se avance en el tiempo.
64. Aplicar la mejor red neuronal seleccionada para el pronóstico de los volúmenes de escurrimiento que se registrarán en las estaciones hidrométricas o ingresarán a los embalses de las presa, en los siguientes tres meses, mes a mes.
65. Estimar los índices de Escurrimiento de sequía (SDI), asociados a los volúmenes de escurrimiento pronosticados para los siguientes tres meses.
66. Clasificar la fase de la sequía hidrológica esperada para los tres meses siguientes, con base en los índices SDI estimados en el punto anterior.
67. Estimar el índice de estado de las presas (Ie), para los siguientes tres meses; considerando los volúmenes de ingreso a las presas pronosticados en el punto 30, los volúmenes de la demanda futura de los siguientes tres meses y el volumen de almacenamiento esperado al primer día de cada uno de los meses para los que se estimara el índice de estado.
68. Replicar esta metodología a otras cuencas y a otros casos específicos del OCPN y del país.



## **Aplicación de las RNAs en el Pronóstico de Sequías Hidrológicas**

En esta sección, se aplica la metodología propuesta en el pronóstico de sequías hidrológicas mediante redes neuronales, de los volúmenes de escurrimiento y de ingreso a las presas (Q) y de los índices de sequía hidrológica (SDI, Ie), a 1, 2 y 3 meses, a las principales corrientes y presas existentes en el OCPN.

El análisis multivariado del comportamiento histórico de los escurrimientos mensuales de los ingresos a los embalses se realizó considerando su variabilidad temporal, así como las variables de precipitación, evaporación potencial y temperaturas medias, máximas y mínimas registradas en las estaciones meteorológicas con influencia en la cuenca de aportación al vaso de las presas. El período considerado para el análisis dependió de su nivel de información; haciendo diferentes combinaciones de las variables. Para cada caso en particular se llevó a cabo el análisis de componentes principales mediante Programa InfoStat, determinando el grado de influencia de dichas variables en la determinación del volumen de ingreso mensual a los embalses; así como su grado de dispersión y de ajuste de curvas a los datos.

Se evalúa el pronóstico de la sequía hidrológica mediante métodos estadísticos (Balzarini, 2011) y el uso del Programa InfoStat ([www.infostat.com.ar](http://www.infostat.com.ar)), determinando su grado de ajuste o de error (Dawson, 2001).

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Basogain, 1998. Redes Neuronales Artificiales y sus Aplicaciones. Texto de las publicaciones de la Escuela de Ingenieros y html: CampusVirtual-MaterialDocente-CursoRNA.
- Basogain, 2009. Curso Redes Neuronales Artificiales y sus Aplicaciones. Escuela Superior de Ingeniería de Bilbao, EHU; email: xabier.basogain@ehu.es.
- Bocco M., Ovando G., Sagayo S. and Willington E. (2007): Neural Network Models For Land Cover Classification From Satellite Images. *Agricultura Técnica (Chile)*, 67(4):414-421 (octubre-diciembre 2007).
- Bocco M., Ovando G., Sagayo S., Willington E. and Heredia S. (2012): Estimating soybean ground cover from satellite images using neural-networks models. *International Journal of Remote Sensing*, 33:6, 1717-1728. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2011.600347>.
- Bocco M.; Ovando G, 2013. Notas sobre redes neuronales artificiales. CREAN,UNC.
- CONAGUA, 2014. Comisión Nacional del Agua. OCPN. <http://www.conagua.gob.mx>
- CREAN, 2013 Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales, FCA/UNC. Monitoreo de Sequías. [http://crean.org.ar/monitoreo/palmer\\_index.htm](http://crean.org.ar/monitoreo/palmer_index.htm)
- Dawson C. W. and Wilby R. L., 2001. Hydrological modelling using artificial neural networks. *Progress in Physical Geography*, 25, 1, pp. 80-108.
- Douriet J.C., 2010. Caracterización y evaluación de escenarios por sequía en la cuenca y acuífero del río Culiacán. Tesis de maestría. Consultada el 22/03/2013.
- Haykin S., 1994. *Neural Networks: a Comprehensive Foundation*. MacMillan, New York.
- Hyun-Suk and José D. Salas, 2000. Regional drought analysis based on neural networks. *J. of Hydrologic Engineering* 5(2):145-155.
- Kim T-W, Valdés, J.B. and Aparicio, J. 2002. Frequency and Spatial Characteristics of Droughts in the Conchos River Basin, Mexico. *Water International*: 27 (3): 420–430.
- Kim T.W., and J.B. Valdes, 2003: Nonlinear model for drought forecasting based on a conjunction of wavelet transforms and neural networks. *J. Hydrol. Eng.*, 8, 319–328.
- Kim S., Kim H.S., 2008. Neural networks and genetic algorithm approach for nonlinear evaporation and evapotranspiration modeling. *Journal of Hydrology* 351, 299–317.
- McCulloch W.S. and Pitts W. 1943: A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5, 115–33.
- Minsky M.L. and Papert S.A. 1969. *Perceptrons*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Morid S., V. Smakhtin and K. Bagherzadeh, 2007: Drought forecasting using artificial neural networks and time series of drought indices. *Int. J. Climatol.*, 27, 2103–2111.

- Planchuelo A.M. & A.C. Ravelo, 2003 Monitoreo y evaluación de la cobertura vegetal en relación a los procesos que conducen a la desertificación. En E. Abraham, D. Tomasini y P. Maccagno, Ed. Indicadores de la Desertificación en América Latina y el Caribe: 90-91.
- Planchuelo Ravelo, A.M. & A.C. Ravelo, 1985. Drought/Crop Condition Assessment Methods for Northeast Brazil, Mexico, Paraguay and Uruguay. Edit. Univ. Missouri Press. Missouri, U.S.A. 128 págs., ilustr.
- Ravelo A.C., R. Sanz Ramos, Douriet C.J.C., (2014). Detección, evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte. *AgriScientia*, Vol. 31 (1).
- Ravelo A.C., A.M. Planchuelo & M. Cherlet. 2004. Monitoring land cover and drought occurrence along an ecological gradient in Argentina. SPOT Vegetation Meeting. Belgica.
- Ravelo A., A. Planchuelo, O. Rojas, T. Nègre & M. Cherlet, 2003. Monitoreo de cultivos y pronóstico de rendimientos: herramientas para la alerta temprana de seguridad alimentaria. JRC-FAO-CREAN, ISBN 92-894-6522. Italia. 85pp.
- Ravelo A.C. & A.M. Planchuelo, 2002. Utilización de los perfiles de NDVI (NOA y SPOT-Vegetation) para la evaluación de los rendimientos de soja y maíz. Actas IX Reunión de Agrometeorología, Vaquerías, Córdoba.
- Ravelo A.C., R. Zanvettor, & W. Da Porta, 2001. Desarrollo de un sistema para la detección, seguimiento y evaluación de las sequías agrícolas en Argentina. *Revista Argentina de Agrometeorología* 1(2): 27-34.
- Ravelo A.C. & J.A. Santa, 2000. Estimación de las precipitaciones utilizando información satelital y terrestre en Córdoba (Argentina) (Estimating rainfall using ground and satellite information in Córdoba, Argentina). *AgriScientia* 17: 21-27.
- Ravelo A.C., 2000. Caracterización Agroclimática de las sequías extremas en la región pampeana argentina. *Revista Facultad Agronomía* 20(2): 187-192.
- Ravelo A.C. & M. Herrero, 1999. Índice de sequía de Palmer. Software académico Registrado en Dirección Nac. Derechos de Autor No. 30666/99. En CD.
- Ravelo A.C. & A.J. Pascale, 1997. Identificación de ocurrencia de sequías mediante imágenes del satélite NOAA e información terrestre. *Rev.Fac. Agron.* 17(1): 105-107.
- Ravelo A.C. & V.H. Rotondo, 1987. Variabilidad de las sequías en las regiones húmedas y semiáridas Drought variability in arid and semi-arid regions). 1ra. Conf. sobre regiones áridas y semiáridas. Univ. Nac. de Santiago del Estero, Argentina.
- Ravelo A.C., 1980. Drought/Food production problems in Haiti: A case study for 1978. Tech. Report to USAID/OFDA, 57 pp.
- Smith L. (2003): An Introduction to Neural Networks, Centre for Cognitive and Computational Neuroscience.

Smith M., 1996: Neural Networks for Statistical Modeling. International Thompson Computer Press, 235 pp.

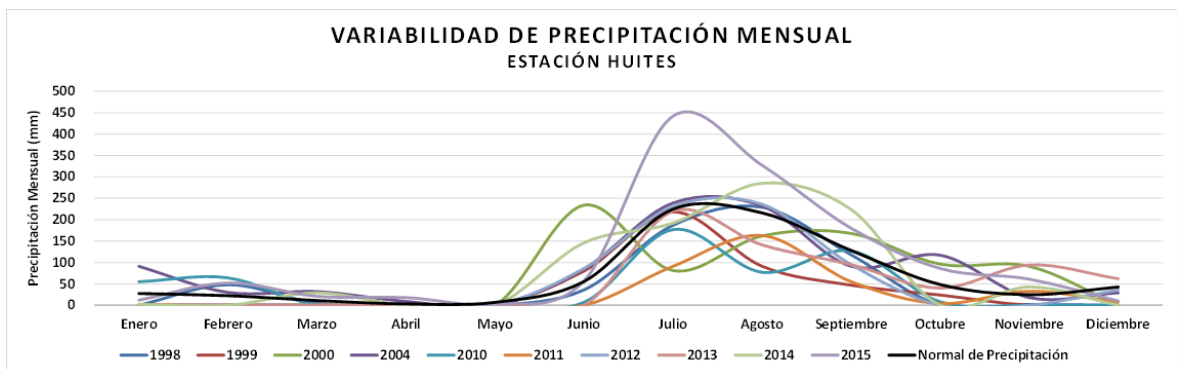
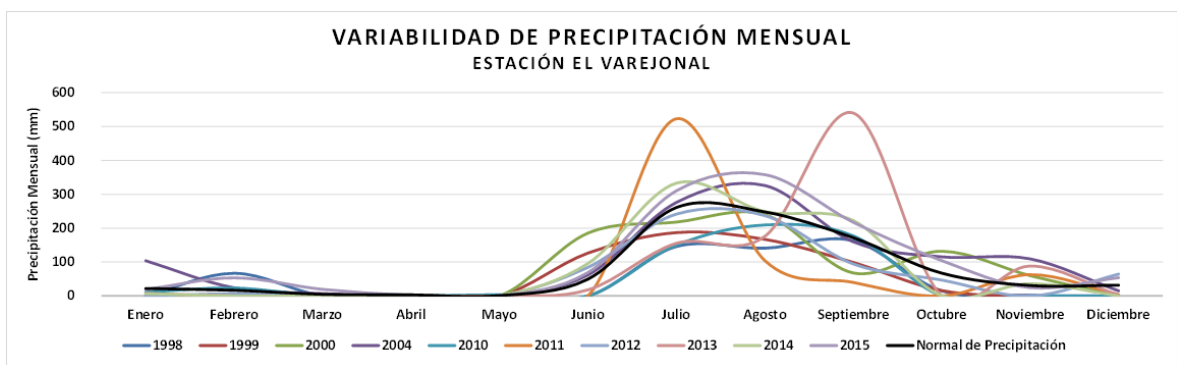
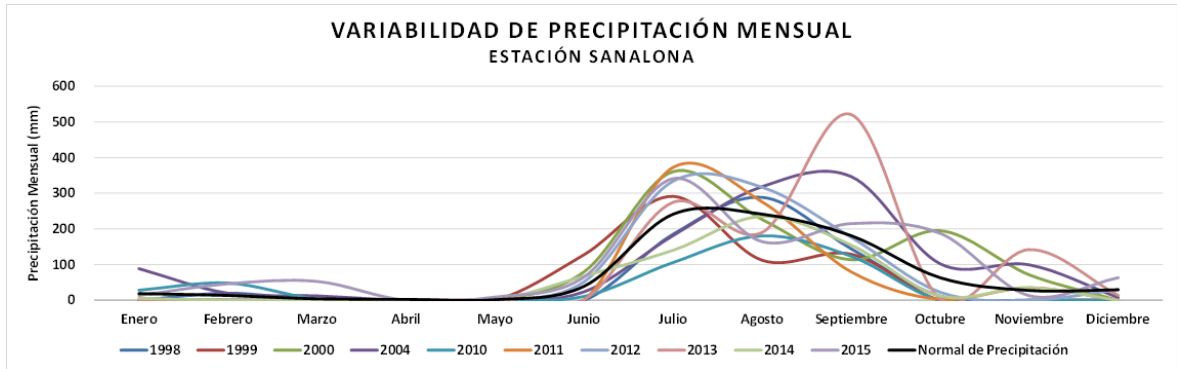
[www.neurosolutions.com](http://www.neurosolutions.com)

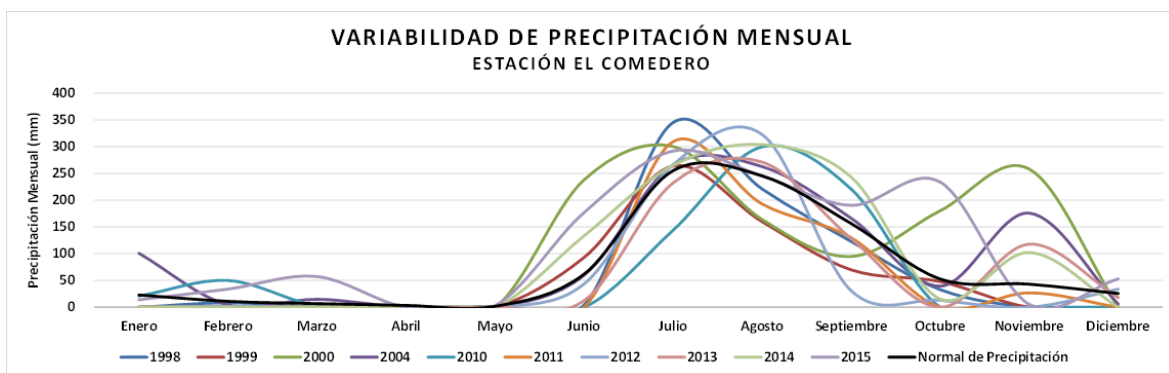
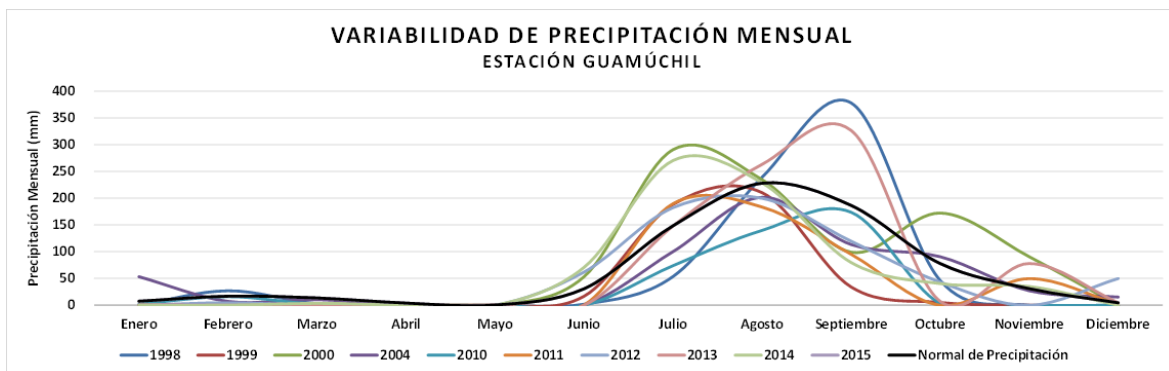
[www.infostat.com.ar](http://www.infostat.com.ar)

Zanvettor R.E & A.C. Ravelo, 2000. Using the SPI to monitor the 1999-2000 drought in Northeastern Argentina. Drought Network News 12(3): 3-4.

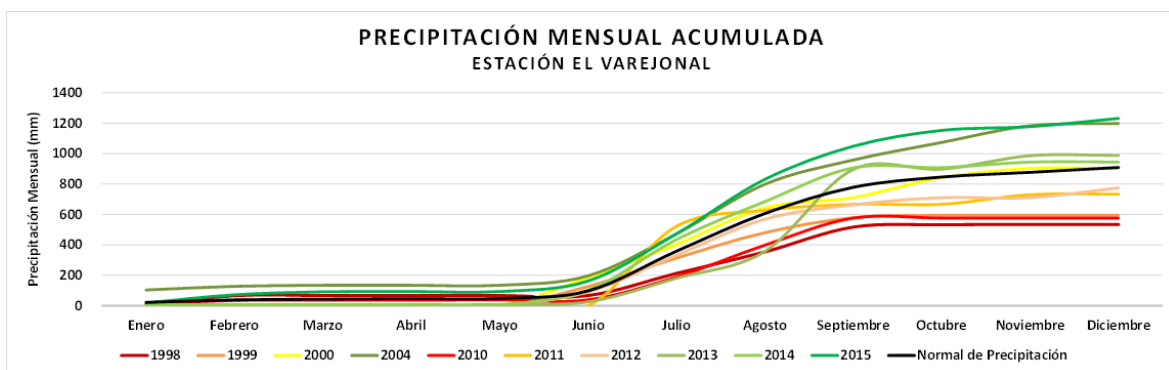
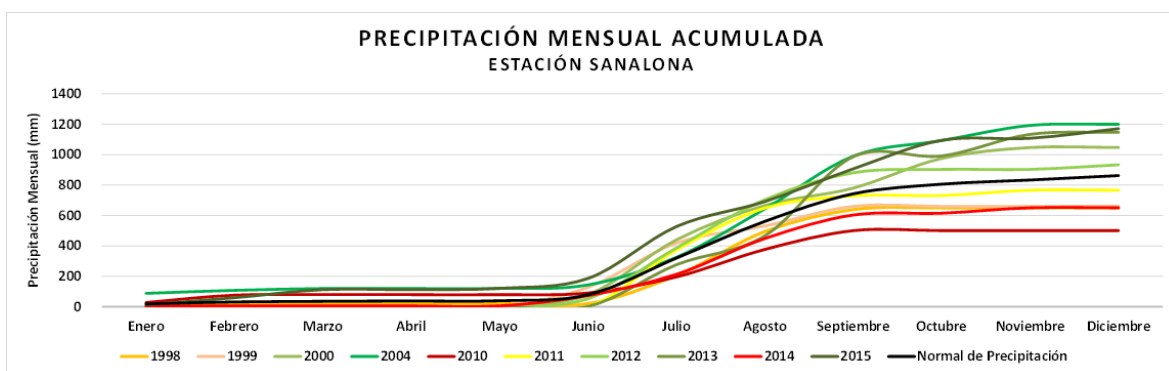
## ANEXO 2: VARIABILIDAD DE PRECIPITACIÓN MENSUAL Y PRECIPITACIÓN MENSUAL ACUMULADA

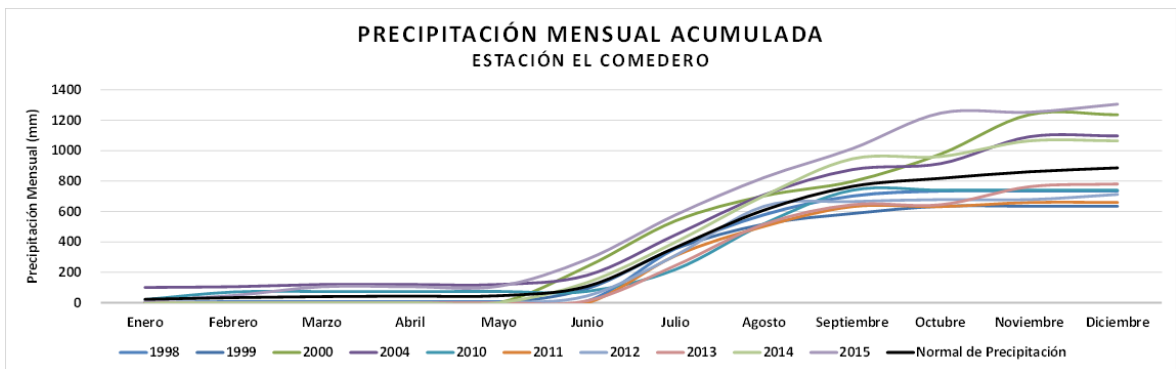
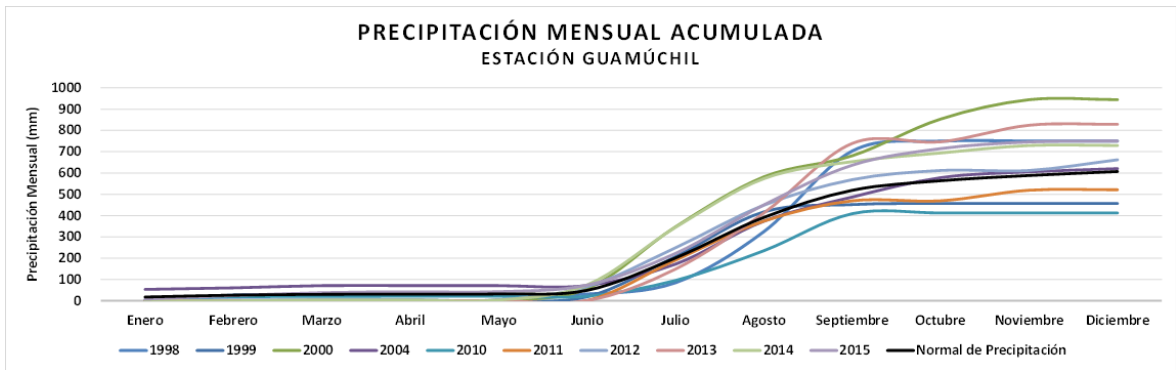
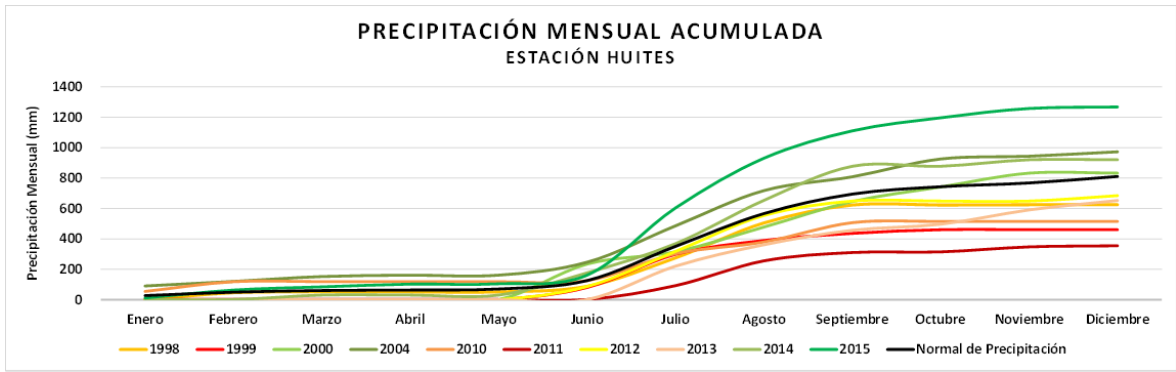
### Variabilidad de precipitación mensual





## Precipitación Mensual Acumulada





### **ANEXO 3: EL NIÑO ANÁLISIS DETALLADO DEL COMPORTAMIENTO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y DE ESCURRIMIENTOS EN EL OCPN PARA EVENTOS DEL FENÓMENO DE EL NIÑO.**

#### **La Niña 1984-1985 (Fuerte)**

PRECIPITACIONES NORMALES, SPI: condiciones en humedad de normalidad a extrema, moderada para la anomalía más negativa. Q: escurrimientos por encima de la media con picos en enero de 1985. SDI: condiciones en humedad de normalidad a moderada, normalidad para la anomalía más negativa. Ie: condiciones en humedad de normalidad a moderada, normalidad para la anomalía más negativa.

#### **La Niña 1988-1989 (Fuerte)**

PRECIPITACIONES NORMALES CON PEQUEÑOS DEFICIT. SPI: condiciones de normalidad a sequía severa (coincide con la anomalía más negativa). PDSI: condiciones de sequía de moderada a severa, severa para la anomalía más negativa. Q: condiciones en humedad de normalidad a moderada, normalidad para la anomalía más negativa. SDI: condiciones de humedad ligera a sequía ligera, normal para la anomalía más negativa. Ie: condiciones en humedad de normalidad a moderada, normalidad para la anomalía más negativa.

#### **La Niña 1995-1996 (Débil)**

DEFICIT DE PRECIPITACIÓN. SPI: de condición de normalidad a sequía moderada (tiene un mes con la anomalía más negativa). PDSI: condiciones de sequía de incipiente a moderada, incipiente para la anomalía más negativa. Q: condiciones en humedad de normalidad a moderada, normalidad para la anomalía más negativa. SDI: condiciones de



normal a sequía ligera (coincide con la anomalía más negativa). Ie: condiciones en humedad de normalidad a moderada, normalidad para la anomalía más negativa.

### **La Niña 1998-2000 (Fuerte)**

FUERTE DEFICIT DE PRECIPITACIÓN EN TODO EL PERÍODO 1998-2001, ALTERANDO EL MONZON MEXICANO (JUNIO-OCTUBRE). SPI: de condición de normalidad a sequía moderada, recuperación a humedad moderada; SPI: de humedad moderada a sequía extrema (ocurre un mes antes que la anomalía más negativa). PDSI: condiciones de normalidad a sequía extrema (coincide con la anomalía más negativa); PDSI: condiciones de sequía extrema a humedad incipiente con la anomalía más negativa. Q: condiciones en humedad de normalidad a moderada, normalidad para la anomalía más negativa; Q: condiciones en humedad de normalidad a moderada, normalidad para la anomalía más negativa. SDI: condiciones de sequía ligera a humedad ligera. Normalidad para la anomalía más negativa; SDI: condiciones de humedad ligera a normalidad y luego a humedad moderada y luego a normalidad (a la que también corresponde la anomalía más negativa). Ie: condiciones en humedad de normalidad a moderada, normalidad para la anomalía más negativa; Ie: condiciones en humedad de normalidad a moderada, normalidad para la anomalía más negativa.

### **La Niña 2007-2008 (Fuerte)**

DEFICIT DE PRECIPITACIÓN. SPI: En Niño Neutro cuando inicia la pendiente descendiente se presenta sequía severa (un mes antes de que se presente la Niña). En evento de Niña Fuerte se presentan condiciones de humedad moderada y en Niño Neutro en pendiente ascendente se presentan condiciones de humedad excesiva. PDSI: de humedad moderada a sequía incipiente, normalidad con la anomalía más negativa. Q: condiciones en humedad de normalidad a moderada, normalidad para la anomalía más negativa. SDI: normalidad en todo el intervalo de tiempo de las anomalías negativas. Ie: condiciones en humedad de normalidad a moderada, normalidad para la anomalía más negativa.

## **La Niña 2010-2012 (Moderado)**

FUERTE DEFICIT DE PRECIPITACIÓN, DEFICIT MODERADO, LEVE. SPI: De sequía moderada a normalidad hídrica y luego a sequía moderada todo en evento Niña moderada; luego a Niño neutro con humedad moderada; y de nuevo a Niña moderada con sequía moderada. PDSI: de normalidad a sequía incipiente, recuperación a humedad incipiente (coincide con la anomalía más negativa). Q: condiciones en humedad de normalidad a moderada, normalidad para la anomalía más negativa. SDI: de humedad ligera a sequía ligera, recuperación a normalidad y Ie: condiciones en humedad de normalidad a moderada, normalidad para la anomalía más negativa nuevamente desciende a sequía ligera, normalidad y sequía ligera para las anomalías más negativas.

# ANEXO 4: PLAN DE RIEGO

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA													ANEXO 6.1				
AREA: ORGANISMO DE CUENCA PACIFICO NORTE.													CAPACIDAD A N.A.M.E. 970,581.0				
DISTRICTO DE RIEGO: No. 010 CULIACAN - HUMAYA.													CAPACIDAD A N.A.M.O. 673,471.0				
FUNCIONAMIENTO DEL VASO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO: SANALONA.													CAPACIDAD DE CONSERVACIÓN 673,471.0				
													CAPACIDAD ÚTIL 668,998.0				
													CAPAC. MINIMA DE OPERACIÓN 39,000.0				
													CAPACIDAD MUERTA 4,473.0				
													AÑO AGRÍCOLA: 2015 - 2016				
MESES	ALMACENAMIENTO INICIAL (miles de m <sup>3</sup> )	COTA DEL EMBALSE (m)	SUPERFICIE DE EMBALSE (Has)	LLUVIA MEDIA MENSUAL (mm)	ENTRADAS					SALIDAS					ALMACENAMIENTO FINAL		
					LLUVIA (miles de m <sup>3</sup> )	RÍOS (miles de m <sup>3</sup> )	TRASVASO (miles de m <sup>3</sup> )	OTRAS (miles de m <sup>3</sup> )	TOTAL (miles de m <sup>3</sup> )	EVAPORACIÓN MODIFICADA POR 0.77 (mm)	SBT. CULIACAN (miles de m <sup>3</sup> )	DESFOGUES (miles de m <sup>3</sup> )	DERRAMES (miles de m <sup>3</sup> )	TOT. EXTR. (miles de m <sup>3</sup> )	TOTAL (miles de m <sup>3</sup> )	(miles de m <sup>3</sup> )	(miles de m <sup>3</sup> )
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)
OCTUBRE	683,660.0	156.65	4,483	63.3	2,844.1	0.0	0.0	0.0	2,844.1	105.41	4,736.2	93,444.1	93,444.1		93,444.1	98,180.3	598,323.8
NOVIEMBRE	598,323.8	154.42	4,080	25.6	1,052.6	0.0	0.0	0.0	1,052.6	86.86	3,543.7	85,500.3	85,500.3		85,500.3	88,044.0	510,332.4
DICEMBRE	510,332.4	152.15	3,657	32.6	1,192.2	0.0	0.0	0.0	1,192.2	69.69	2,548.4	63,416.2	63,416.2		63,416.2	65,964.6	445,960.0
ENERO	445,960.0	150.30	3,359	20.4	685.2	0.0	0.0	0.0	685.2	73.54	2,470.0	104,327.7	104,327.7		104,327.7	106,797.7	339,447.5
FEBRERO	339,447.5	146.87	2,825	16.5	486.1	17,440.0	0.0	0.0	17,926.1	95.63	2,701.7	134,212.3	134,212.3		134,212.3	136,914.0	220,498.6
MARZO	220,498.6	142.07	2,208	0.0	0.0	1,640.0	0.0	0.0	1,640.0	145.61	3,215.0	106,226.6	106,226.6		106,226.6	109,441.6	112,638.0
ABRIL	112,638.0	136.31	1,482	0.0	0.0	1,380.0	0.0	0.0	1,380.0	179.49	2,660.0	29,753.1	29,753.1		29,753.1	32,413.1	81,604.9
MAYO	81,604.9	134.03	1,228	0.0	0.0	1,030.0	0.0	0.0	1,030.0	211.75	2,600.3	2,909.3	2,909.3		2,909.3	5,509.6	77,125.3
JUNIO	77,125.3	133.65	1,177	36.6	430.8	6,610.0	0.0	0.0	7,040.8	191.58	2,254.8	8,945.0	8,945.0		8,945.0	11,199.8	72,966.3
JULIO	72,966.3	133.28	1,128	219.0	2,470.3	59,290.0	0.0	0.0	61,760.3	145.07	1,636.4	7,506.3	7,506.3		7,506.3	9,142.7	125,683.9
AGOSTO	125,683.9	137.15	1,585	248.4	3,937.1	106,110.0	0.0	0.0	110,047.1	126.13	1,989.1	6,974.1	6,974.1		6,974.1	9,973.2	226,657.9
SEPTIEMBRE	226,657.9	142.35	2,235	255.0	5,699.3	80,000.0	0.0	0.0	85,699.3	108.65	2,428.3	6,785.0	6,785.0		6,785.0	9,213.3	303,143.9
TOTAL	303,143.9			917.6	18,777.7	273,500.0	0.0	0.0	292,277.7	1,539.38	32,783.9	650,000.0	650,000.0		650,000.0	682,793.9	
APORTACIONES AL 98 % DE PROB. DE OCURRENCIA SMADA ACUM.																	
REALIZÓ:	ING. ARTURO SANCHEZ SANDOVAL											FECHA: OCTUBRE DE 2015					
	JEFE DE OPERACIÓN DEL DTO. DE RIEGO No. 010 CULIACAN - HUMAYA																
	REVISÓ: ING. SIRIO MORENO ARMENTA																
	JEFE DE LOS DISTRITOS DE RIEGO Nos: 010 Y 074																

**SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES  
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA**

**ANEXO 6.1**

CAPACIDAD A N.A.M.E. 4,034,520.0	
CAPACIDAD A N.A.M.O. 3,086,610.0	
CAPACIDAD DE CONSERVACIÓN 3,086,610.0	
CAPACIDAD ÚTIL 3,086,622.0	
CAPAC. MÍNIMA DE OPERACIÓN 47,000.0	
CAPACIDAD MUERTA 29,986.0	
AÑO AGRÍCOLA: 2015- 2016	
AREA: ORGANISMO DE CUENCA PACÍFICO NORTE	
DISTRITO DE RIEGO: No. 010 CULIACAN - HUMAYA.	

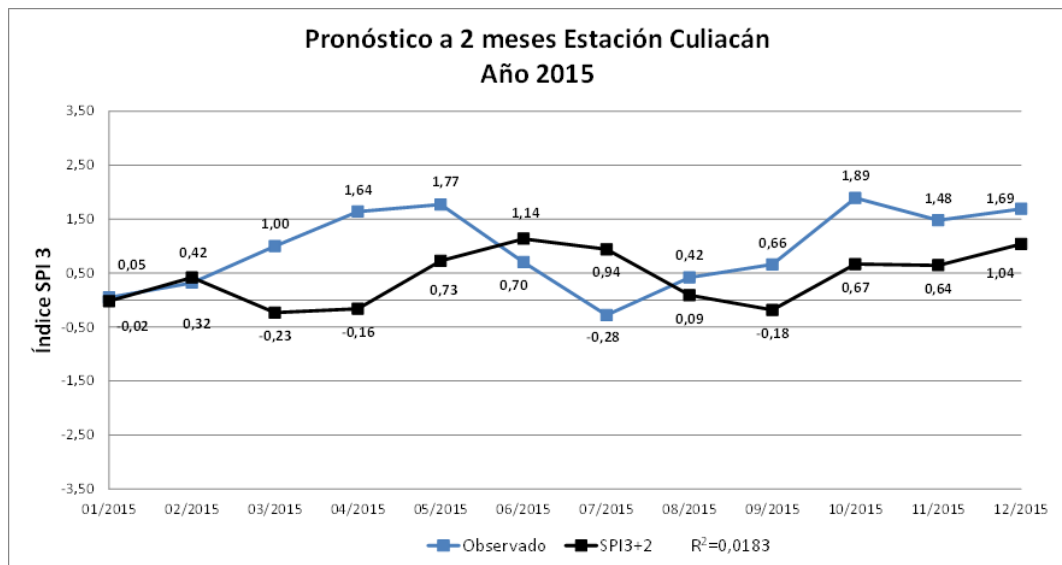
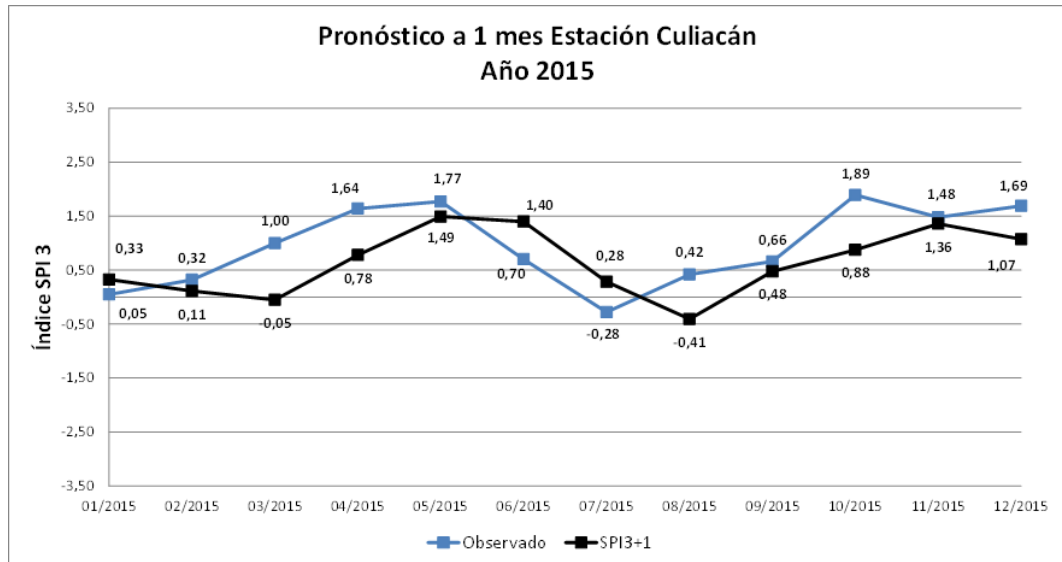
**FUNCIONAMIENTO DEL VASO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO: ADOLFO LOPEZ MATEOS.**

MESES	ALMACENAMIENTO INICIAL (miles de m <sup>3</sup> )	COTA DEL EMBALSE (m)	SUPERFICIE DE EMBALSE (Has)	LLUVIA MEDIA MENSUAL (mm)	ENTRADAS				EVAPORACIÓN MODIFICADA POR 0.77 (mm)	SALIDAS				ALMACENAMIENTO FINAL			
					LLUVIA (miles de m <sup>3</sup> )	RIOS (miles de m <sup>3</sup> )	TRASVASO (miles de m <sup>3</sup> )	OTRAS (miles de m <sup>3</sup> )		TOTAL (miles de m <sup>3</sup> )	EVAPORACIÓN MODIF (miles de m <sup>3</sup> )	SIST. CULIACAN (miles de m <sup>3</sup> )	SIST. HUMAYA (miles de m <sup>3</sup> )	DTO. 074 MOC (miles de m <sup>3</sup> )	TOT. EXTRAC. (miles de m <sup>3</sup> )	TOTAL (miles de m <sup>3</sup> )	FINAL (miles de m <sup>3</sup> )
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)
OCTUBRE	2,230,204.0	168.0	9,715.0	94.5	9,180.7	13,030.0			22,210.7	123.2	11,964.4	0.0	96,697.7	44,746.3	141,443.0	153,407.4	2,099,007.3
NOVIEMBRE	2,089,007.3	166.6	9,370.0	25.2	2,361.2	8,300.0			10,661.2	101.9	9,550.4	0.0	173,286.4	77,973.3	251,269.7	260,820.1	1,848,948.5
NOVIEMBRE	1,848,948.5	163.9	8,714.0	31.3	2,727.5	7,670.0			10,397.5	87.8	7,655.2	2,678.4	164,355.5	87,590.6	254,624.5	262,279.7	1,596,963.3
ENERO	1,596,963.3	160.9	7,968.0	20.9	1,669.5	6,550.0			8,219.5	88.8	7,094.9	2,678.4	190,357.0	67,283.2	260,316.6	267,413.5	1,337,772.2
FEBRERO	1,337,772.2	157.4	7,167.0	19.5	1,397.6	3,670.0			5,267.6	104.0	7,465.1	2,505.6	215,241.4	37,554.9	255,301.9	262,757.0	1,080,282.8
MARZO	1,080,282.8	153.6	6,217.0	0.0	0.0	4,490.0			4,490.0	152.6	9,494.2	2,678.4	188,901.6	56,086.6	247,666.6	257,150.8	827,622.1
ABRIL	827,622.1	149.2	5,253.0	0.0	0.0	2,750.0			2,750.0	182.8	9,600.4	2,592.0	96,382.2	21,723.9	120,698.1	130,298.5	700,073.6
MAYO	700,073.6	146.6	4,895.0	0.0	0.0	420.0			420.0	222.7	10,462.1	57.9	23,075.9	2,883.7	26,017.5	36,479.6	664,014.1
JUNIO	664,014.1	145.8	4,547.0	51.0	2,319.0	420.0			2,739.0	210.7	9,590.0	0.0	11,111.9	1,535.1	12,647.0	22,227.0	644,526.1
JULIO	644,526.1	145.4	4,451.0	237.7	10,590.0	76,980.0			87,560.0	164.3	7,311.4	0.0	8,879.2	1,535.1	10,414.3	17,725.7	714,360.4
AGOSTO	714,360.4	146.9	4,754.0	261.2	12,417.4	281,150.0			293,567.4	143.9	6,639.8	0.0	8,484.7	1,535.4	10,020.1	16,859.9	991,068.0
SEPTIEMBRE	991,068.0	152.1	5,868.0	171.8	10,081.2	76,840.0			88,921.2	124.6	7,312.5	0.0	8,043.2	1,535.5	9,578.7	16,891.2	1,063,098.0
TOTAL	1,063,098.0			913.1	52,794.1	484,470.0			537,204.1	1,707.2	104,310.2	13,190.7	1,184,826.7	40,182.6	1,800,000.0	1,704,310.2	

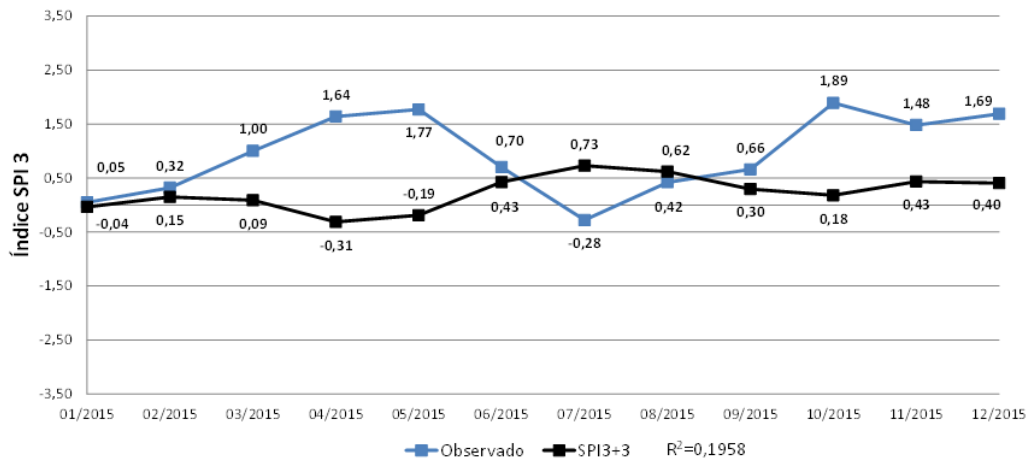
APORTACIONES AL 98% DE PROB. DE OCURRENCIA SUJIMADA	
REALIZÓ: ING. ARTURO SANCHEZ SANDOVAL.	REVISÓ: ING. SIRIO MORENO ARMENTA
JEFE DE OPERACIÓN DEL DTO. DE RIEGO No. 010 CULIACAN - HUMAYA	JEFE DE LOS DISTRITOS DE RIEGO Nos. 010 Y 074
	FECHA: OCTUBRE DE 2015

## ANEXO 5: PRONÓSTICO DE SEQUÍA METEOROLÓGICA

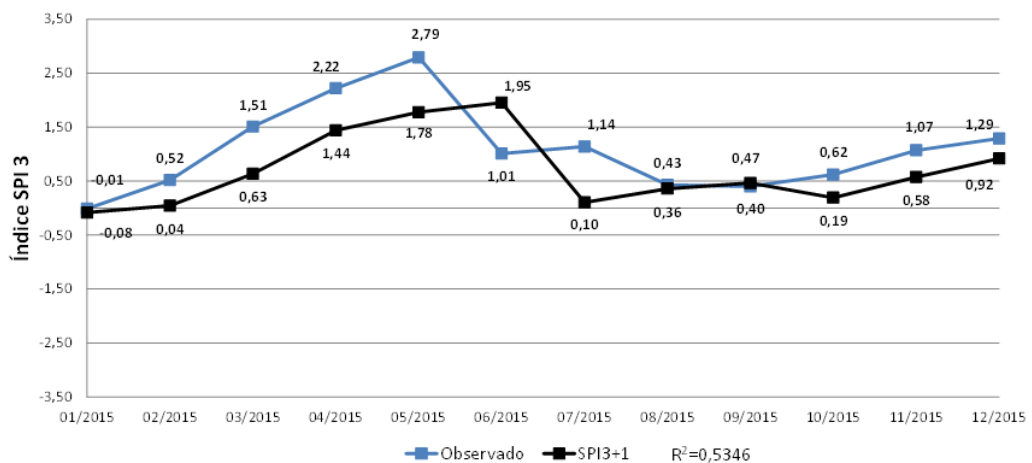
### SPI3



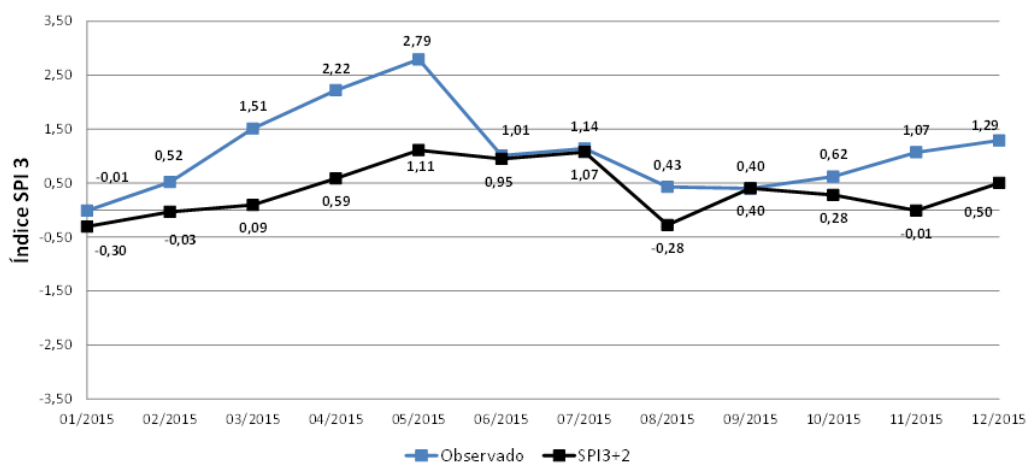
**Pronóstico a 3 meses Estación Culiacán  
Año 2015**

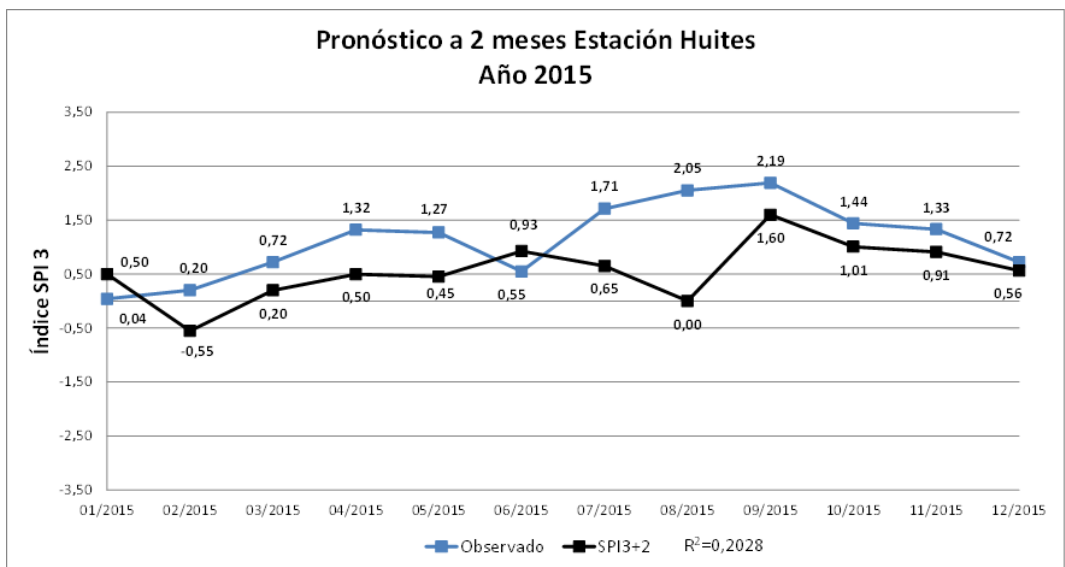
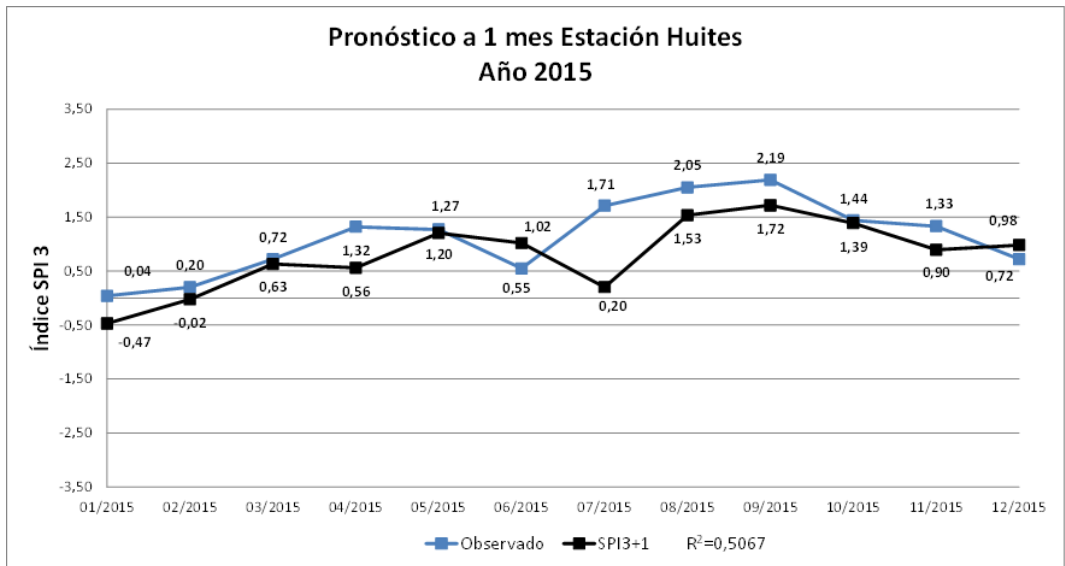
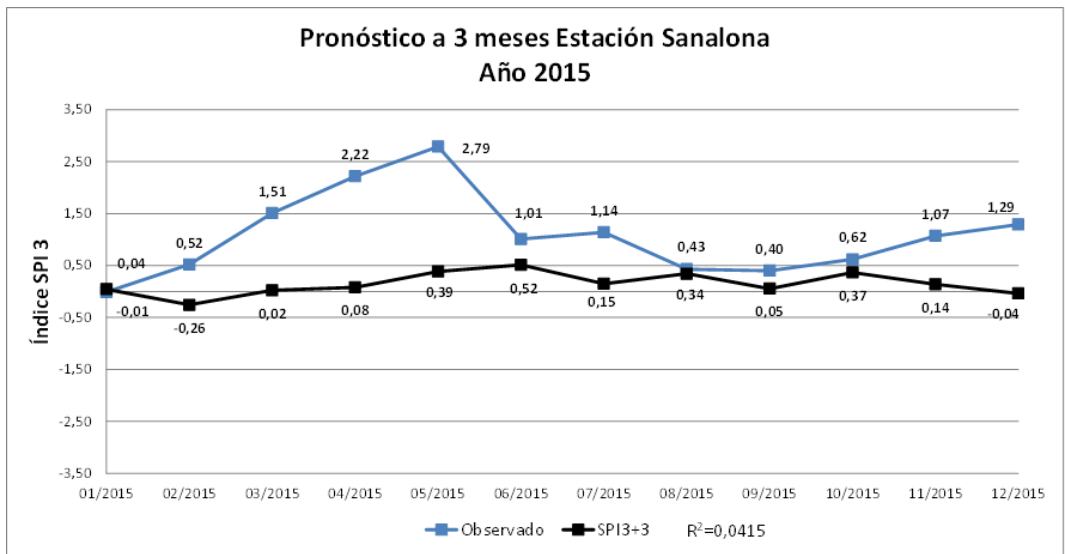


**Pronóstico a 1 mes Estación Sanalona  
Año 2015**

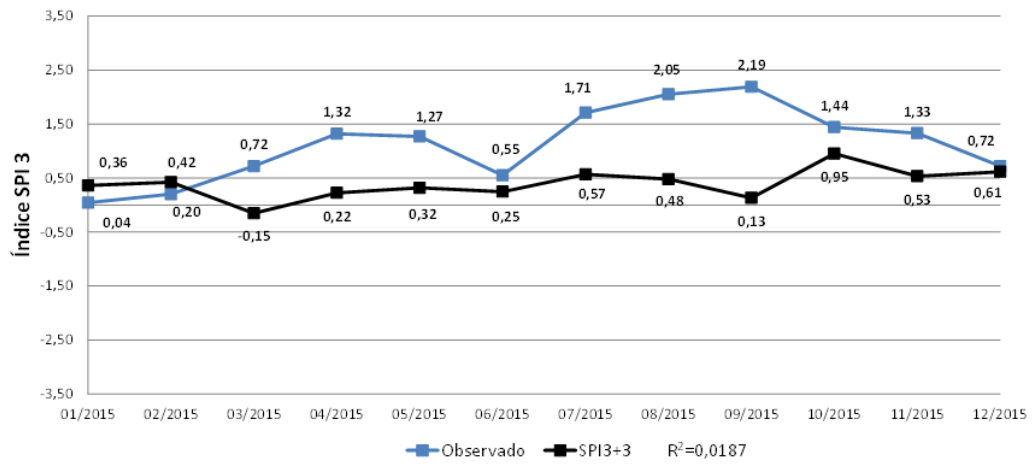


**Pronóstico a 2 meses Estación Sanalona  
Año 2015**



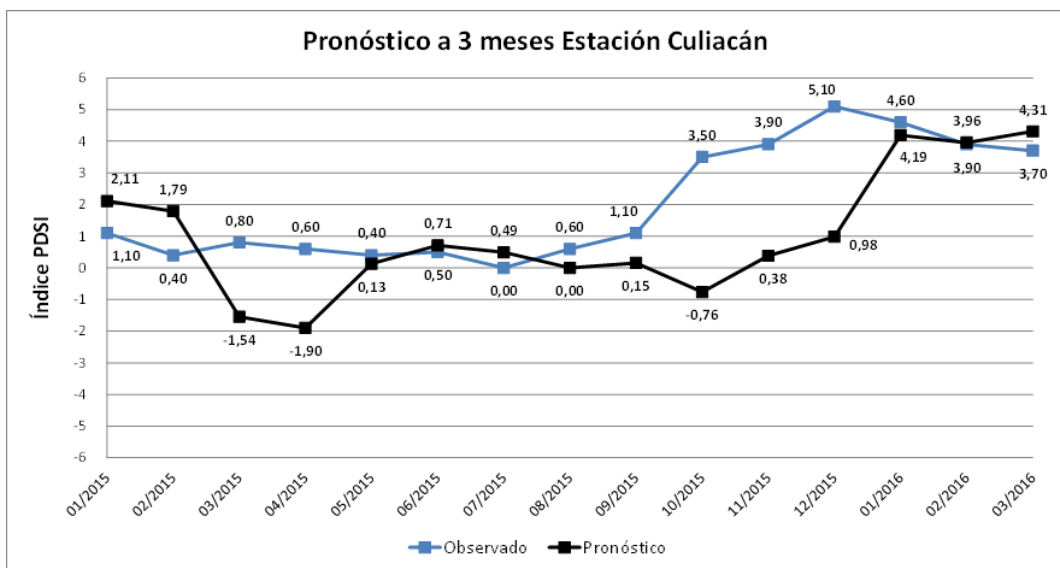
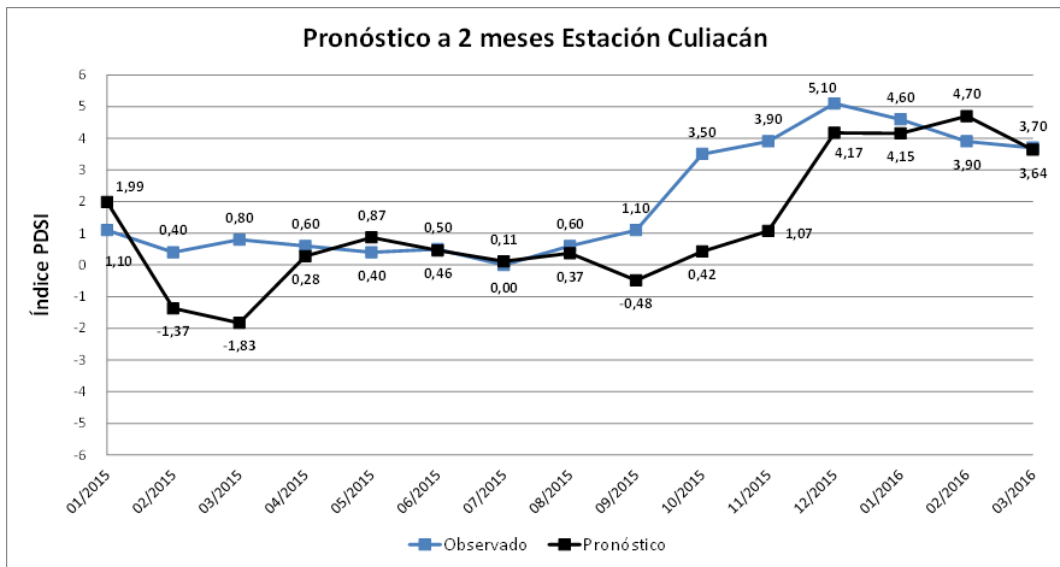
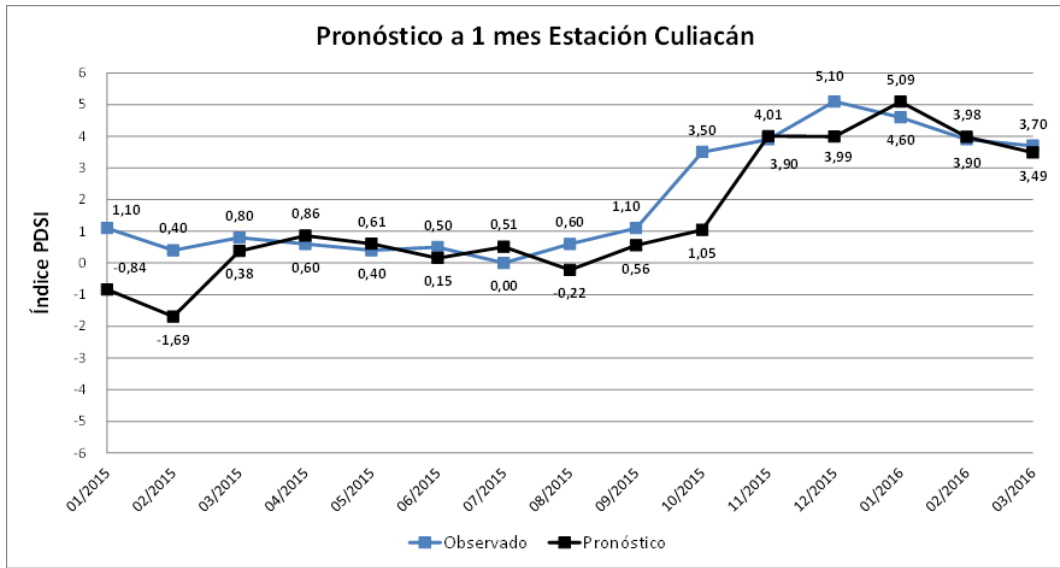


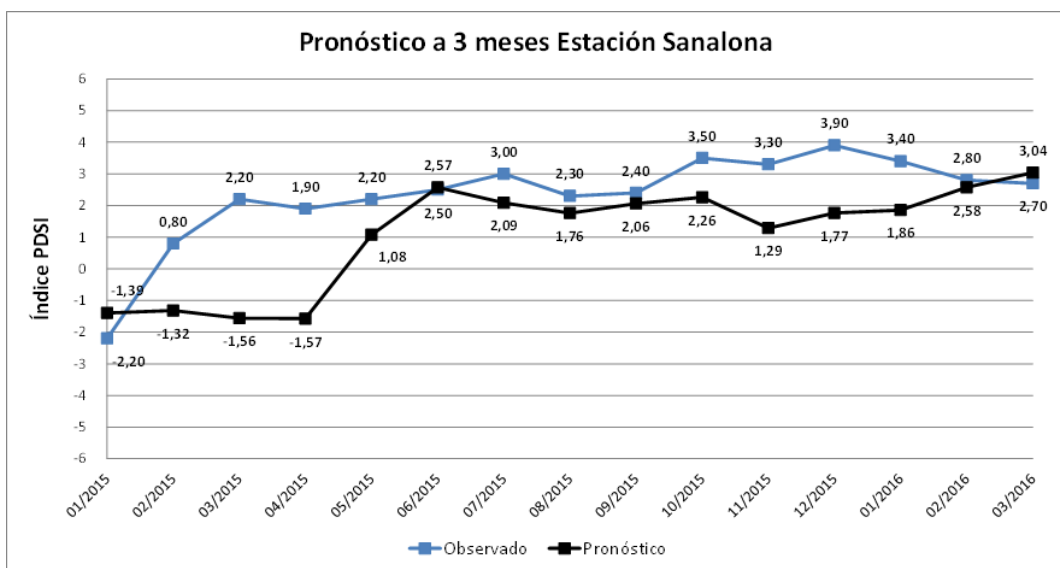
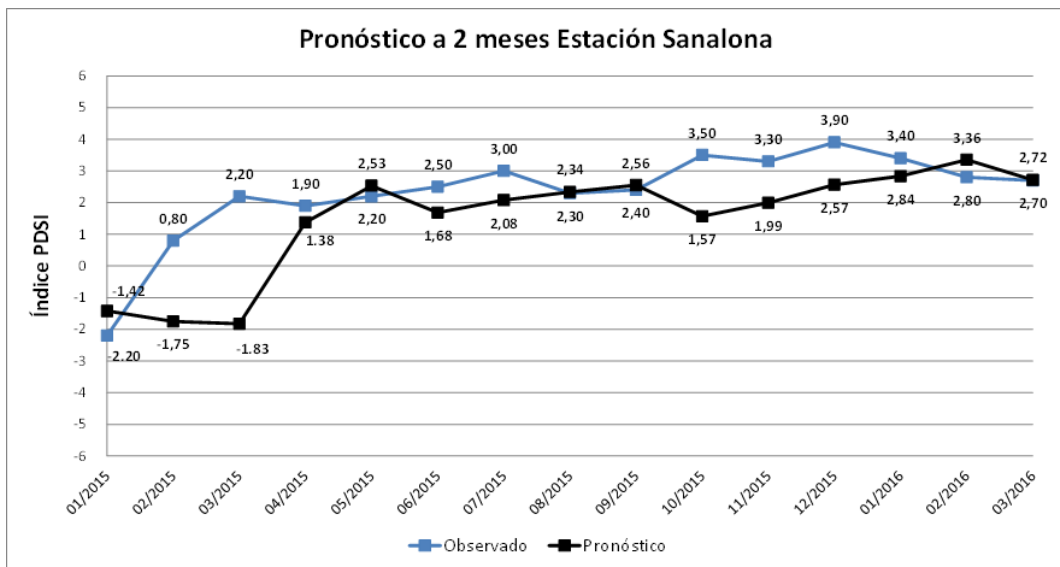
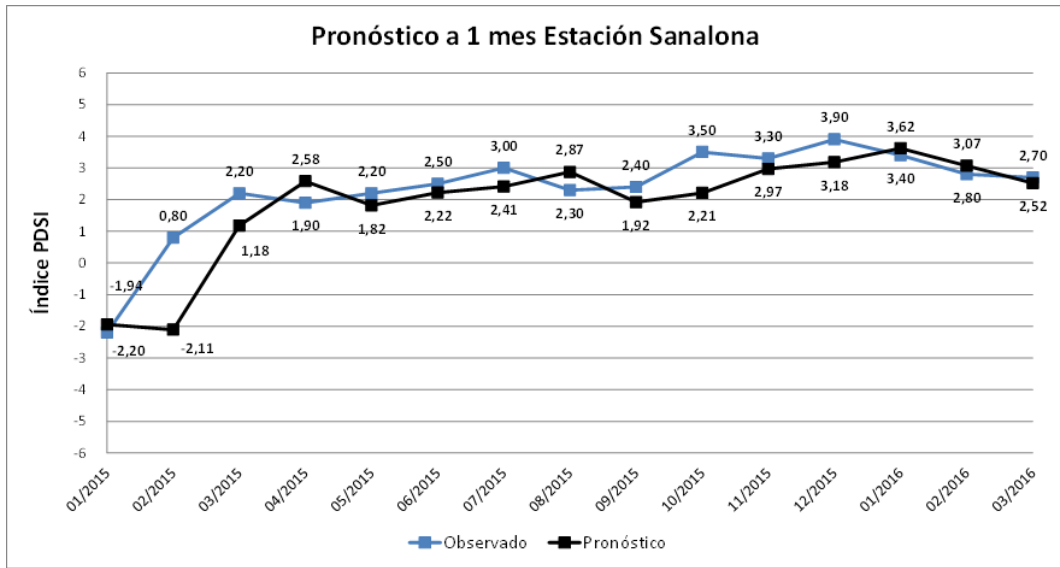
**Pronóstico a 3 meses Estación Huites  
Año 2015**

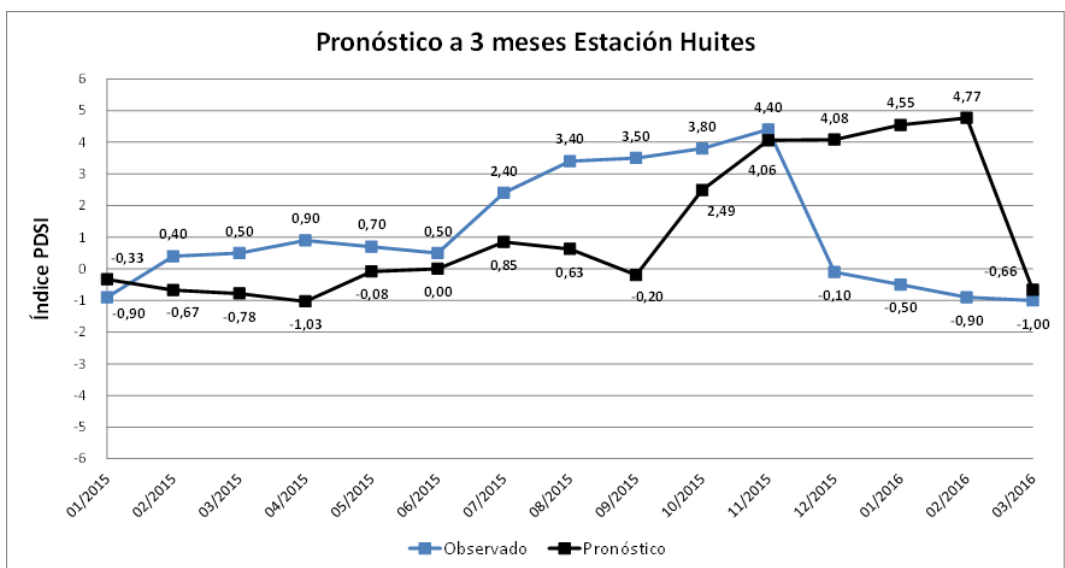
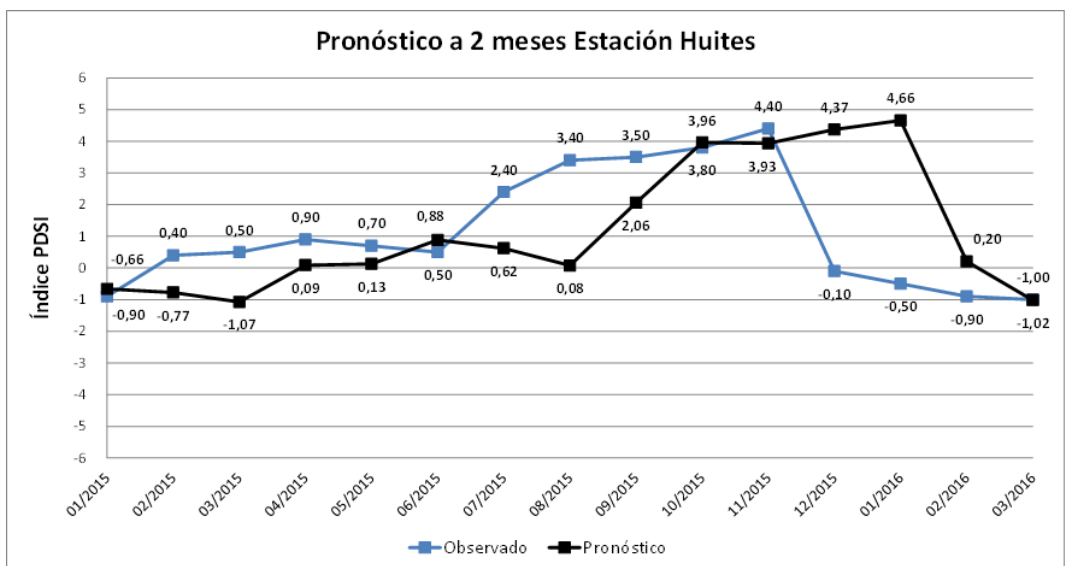
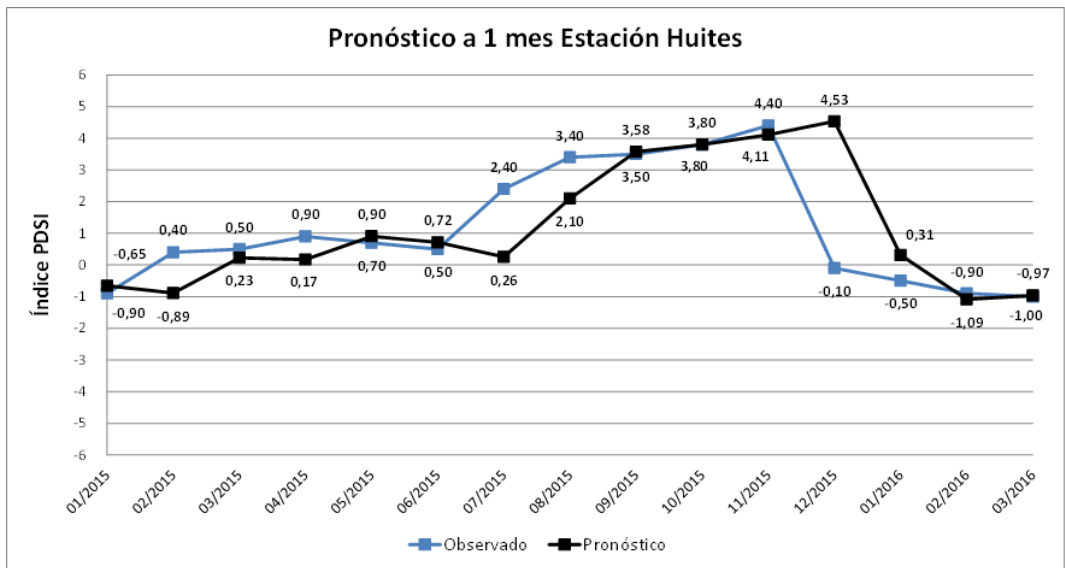




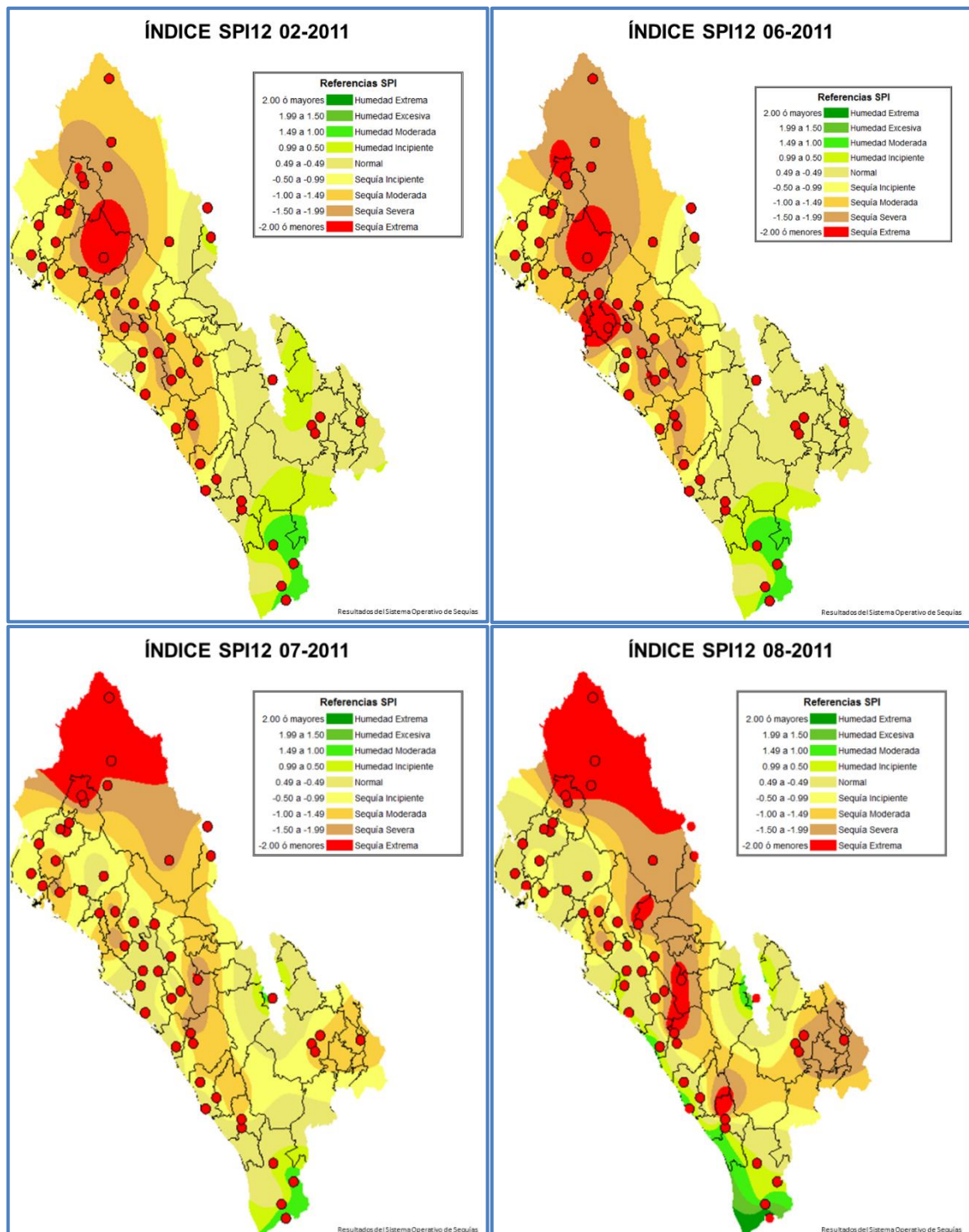
## PDSI

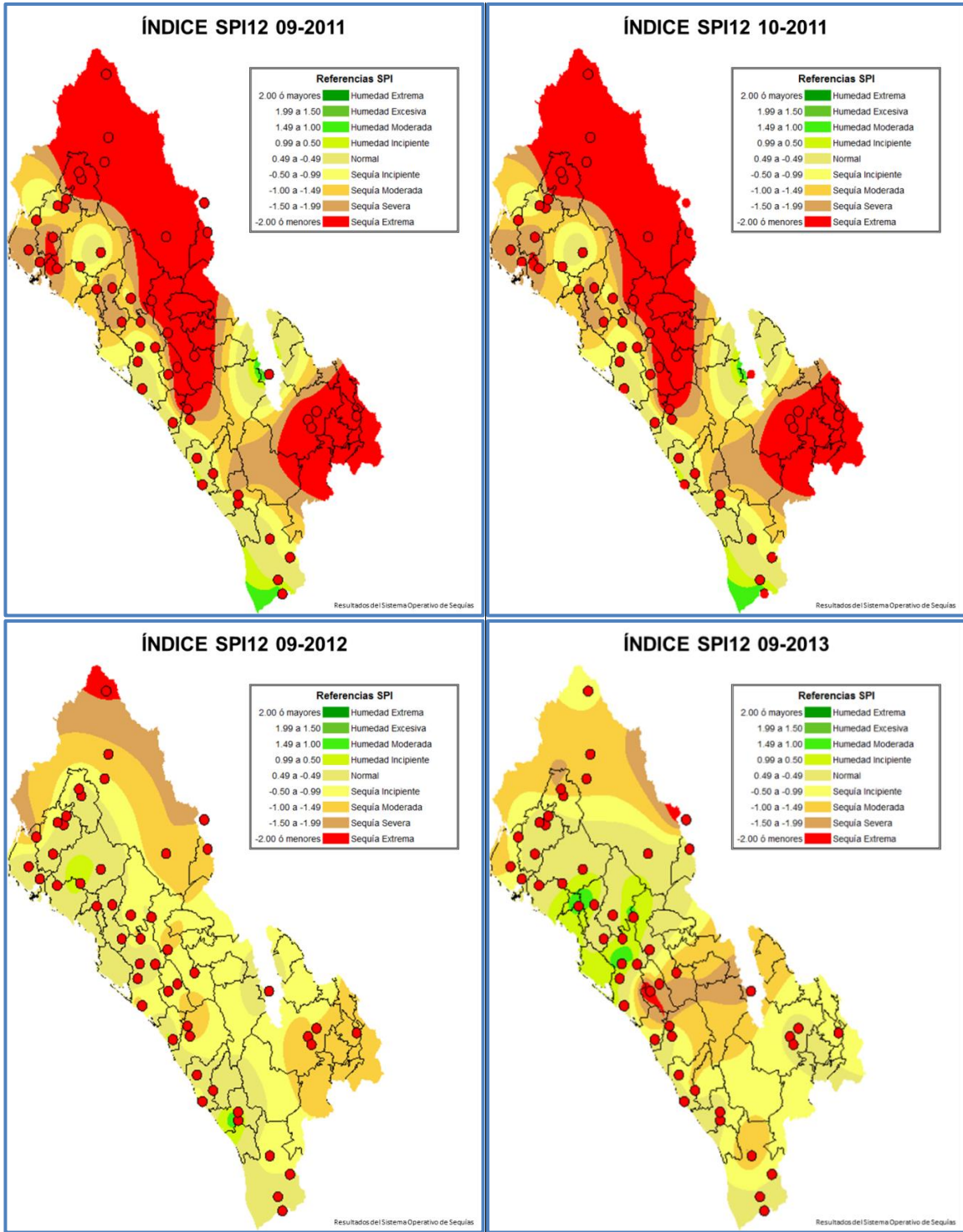


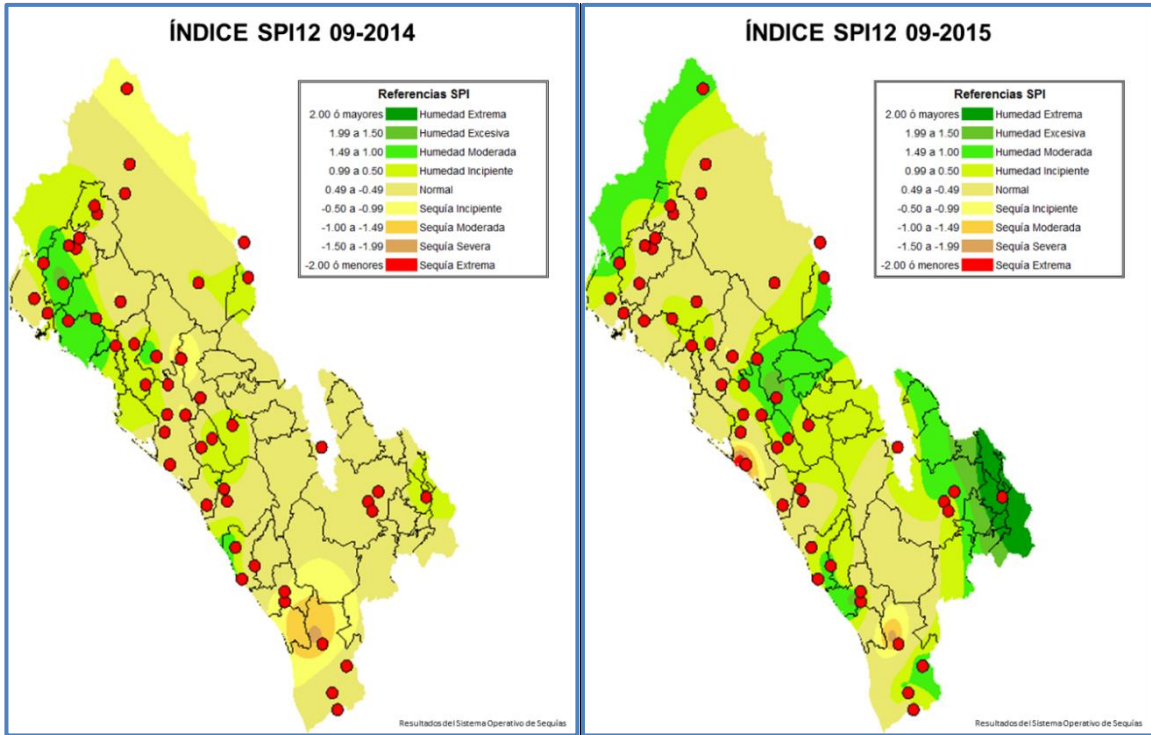




## ANEXO 6: REPRESENTACIÓN ESPACIAL DE ÍNDICE SPI 12







## **ANEXO 7: PROPUESTA DE MEJORAS EN LA METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA ESTIMACIÓN DE LAS VULNERABILIDADES ECONÓMICAS, SOCIALES, AMBIENTALES Y GLOBALES**

1. Indicadores de vulnerabilidad: Algunos de ellos no se utilizan (por ejemplo, Grado de explotación de las cuencas) por lo cual debería ser eliminado del listado. Otros son irrelevantes al fenómeno de la sequía (por ejemplo, viviendas sin drenaje o excusados, con piso de tierra), otros son redundantes o correlacionados (ingreso per cápita y pobreza, analfabetismo y escolaridad). Algunos indicadores pueden ser relevantes en el grado de exposición, sensibilidad y adaptación; tal es el caso de los ingresos per cápita (IPC). Los grupos sociales con mayores IPC están menos expuestos, poseen menor sensibilidad y mayor adaptación y/o recuperación y viceversa los grupos con menores IPC.

Además, el Índice de la calidad del agua (ICA) superficial y subterránea debido a su importancia se deben considerar en los indicadores para el cálculo del índice de vulnerabilidad ambiental.

2. Los pesos utilizados: Para las distintas variables ellos deben ser validados y seguramente no serán los mismos para distintas condiciones socio-económicas o ambientales que se presentan en los diferentes municipios.
3. La aplicación de una distribución probabilística: Cuando se aplica a términos que no son aleatorios sino características intrínsecas de cada municipio, ello no es correcto. Quizás sería más apropiado aplicar una distribución probabilística a la variabilidad de algunos indicadores a nivel sub-municipal.

Por ejemplo, es probable que los ingresos per cápita sean variables según las localidades dentro del municipio, por lo tanto la exposición, sensibilidad y

capacidad de adaptación/recuperación frente a la sequía pueden ser analizadas con una distribución de probabilidades.

4. La obtención de la vulnerabilidad global: La vulnerabilidad global es el producto de las vulnerabilidades equivalentes de los aspectos económicos, sociales y ambientales lo cual no parecería la forma apropiada. Es evidente que tienen mayor peso las vulnerabilidades económicas y sociales que las ambientales frente a la amenaza de las sequías. El peso correcto de cada vulnerabilidad para la determinación de la vulnerabilidad global es motivo de investigaciones y validaciones experimentales.