



# UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



**MCIAM**  
Maestría en Ciencias  
en Ingeniería Ambiental  
UMSNH

## MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

---

FACULTAD DE BIOLOGÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

### EVALUACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA OPERATIVA, EN EL SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC

TESIS FINAL

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:

ING. IVÁN GONZÁLEZ ARREGUÍN

ASESOR:

DR. JULIO CÉSAR ORANTES ÁVALOS

CO-ASESORA:

DRA. SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE

MORELIA, MICH. SEPTIEMBRE DE 2018

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, mi alma máter.

A la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

A la Universidad Politécnica de Valencia por permitirme realizar mi estancia de investigación

Al DR 097 “Lázaro Cárdenas” y al DR 099 “La Magdalena” por su apoyo en proveer información actualizada para la realización de este proyecto.

A la Dra Sonia Sánchez Quispe por abrirme las puertas del Grupo de Investigación de Gestión Integral del Agua, el aporte de sus conocimientos, el apoyo a este trabajo y personal.

Al Dr. Julio César Orantes Ávalos por su gran labor como tutor y por sus conocimientos.

Al Dr. Abel Solera Solera por recibirme en mi estancia en la UPV, por su apoyo académico para la realización de este trabajo.

A José Jaime Madrigal Barrera, Liliana García Romero y a todos los miembros del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) por tanto apoyo durante mi estancia y por su amistad.

A mis compañeros de la maestría y amigos Luis Daniel Oseguera Toledo, Omar Lucas Urbina y María del Mar Navarro Farfán por su apoyo y amistad en todo momento.

A mis padres Efraín González Vargas y Marina Arreguín Aguilar y a mis hermanos Noé, Efraín y Mariela por su apoyo incondicional en todo momento y por ser parte de mi vida.

A mi novia Cristina Castañeda Hernández por estar conmigo y apoyarme en este largo camino.

## **RESUMEN**

En los últimos años se ha observado un incremento importante en la demanda de agua, promovidas por el crecimiento de la población y la expansión de zonas de cultivo. Esto ha llevado a buscar alternativas para mejorar la gestión del agua.

Existen diversos trabajos de evaluación de sequías a nivel mundial, nacional y local, enfocados en un análisis puntual, y en menor medida, regional. Así mismo se evalúa la sequía en los componentes comúnmente medibles del ciclo hidrológico y no a nivel de cuenca desarrollada donde ocurren sequías operativas, además de las hidrológicas.

El objetivo de este trabajo es generar un modelo de Gestión Hídrica que permita la evaluación de la sequía operativa en la Cuenca del Río Tepalcatepec y pretende recuperar información que permita prever y mitigar una sequía futura en la cuenca del Río Tepalcatepec, perteneciente a la Región hidrológica del Balsas, que se localiza al suroeste de nuestro país dentro del Estado de Michoacán y Jalisco.

La metodología para desarrollar el proyecto se basa en la recopilación de datos, análisis y validación estadística de estos. Posteriormente se procedió a la modelación matemática del sistema superficial y subterráneo, con el propósito de realizar un modelo de gestión hídrica y el modelo de sequía operativa que en conjunto permitió obtener el riesgo de fallo o las condiciones en las cuales el sistema no sería capaz de abastecer una demanda, ante la presencia de una sequía operacional.

Se obtuvieron datos de déficit de agua en el sistema para definir medidas de prevención para los efectos negativos de sequía, los cuales nos ayudarán a tomar decisiones acerca de los requerimientos o necesidades en la cuenca.

**Palabras clave:** Río Tepalcatepec, sequías, mitigación, gestión, SIMGES

## **ABSTRACT**

In the last years, has seen an important increase of water demands, promoted by population and growing areas growth. This has led to search alternatives to get better management of water.

There are some drought management works worldwide and at the level national and local, approached in a spot and regional analysis. Likewise drought is evaluated in the measurable components of the hydrological cycle and not to level of hydrological river basin where occurs operative droughts, besides meteorological and hydrological droughts.

The objective of this work is to generate a water management model that allows the evaluation of operational drought in the Tepalcatepec River Basin and pretends to collect information that allows forecast and mitigate a future drought in Tepalcatepec River Basin, which is tributary of hydrological region of Balsas, in the southwest of Mexico, within Michoacan and Jalisco.

The methodology for develop this project is based in the compilation, analysis and statistical data validation. Subsequently, we proceeded to mathematical modeling of the surface and underground system, with the purpose of realizing a water management model and a model of operational drought, which together allowed us to obtain the risk of operative drought failure or the conditions when the system can not supply a demand in the presence of an operational drought.

Water deficit data in the system were obtained to define prevention measures against the negative effects of the droughts which will help us to make decisions about the requirements or necessities in the river basin.

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVO.....	5
3. HIPÓTESIS.....	6
4. JUSTIFICACIÓN.....	7
5. ANTECEDENTES.....	8
5.1 Modelos y herramientas utilizados .....	12
5.1.1 EVALHID .....	13
5.1.2 AQUIVAL.....	23
5.1.3 SIMGES.....	24
5.1.4 MASHWIN .....	27
5.1.5 SIMRISK.....	33
6 METODOLOGÍA.....	36
6.1.- <i>Análisis de la cuenca de estudio:</i> .....	37
6.2.- Recopilación de datos.....	39
6.2.1 Estaciones climatológicas.....	39
6.2.2.- Estaciones hidrométricas.....	39
6.2.3.-Niveles piezométricos de los acuíferos y volúmenes aforados de manantiales. ....	40
6.2.4.- Presas .....	40
6.2.5.- Demanda urbana .....	40
6.2.6.- Demanda industrial.....	41
6.2.7 Demanda agrícola.....	41
6.3. Análisis y validación estadística de los datos hidrométricos y meteorológicos.....	41
6.3.1 Prueba estadística de Helmert.- .....	42
6.3.2. Prueba de secuencias .....	42
6.3.3. Prueba de independencia de eventos.....	42
6.3.4. Llenado de datos .....	43
6.4. Modelación.....	44
Restitución a régimen natural (RN).....	45
6.4.1.- Modelación hidrológica del régimen natural .....	49

6.4.2.- Modelación subterránea .....	49
6.4.3.- Modelación conjunta de la gestión Hídrica .....	49
6.4.4.- Generación de series sintéticas de caudales .....	50
6.4.5.- Modelación de la sequía.....	50
7 RESULTADOS .....	54
7.1 Estaciones Climatológicas .....	54
7.1. Modelación superficial.....	58
Subcuenca 18129.....	61
Subcuenca 18280.....	63
Subcuenca 18181.....	65
Subcuenca Presa San Juanico.....	67
Subcuenca Presa Los Olivos.-.....	69
Subcuenca 18201.....	71
Subcuenca 18202.....	73
Subcuenca 18452.....	75
Subcuenca 18494.....	77
7.2 Modelación Subterránea .....	79
Modelación Subterránea 1.-.....	80
Modelación subterránea 2. ....	84
7.3 Modelación de la Gestión Hídrica .....	87
7.4.- Generación de series sintéticas de caudales.....	99
7.5.- Gestión del riesgo de sequía (SIMRISK) .....	102
7.8 .- Caracterización de sequías hidrológicas y meteorológicas .....	115
7.9 .- Indicador de sequías usado actualmente en Europa .....	119
7.10 .-Discusión de resultados.....	120
8.- CONCLUSIONES .....	122
9.- BIBLIOGRAFÍA .....	125
10.-ACRÓNIMOS .....	133

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.-</b> Esquema conceptual de la simulación del ciclo hidrológico del modelo .....	15
<b>Figura 2.-</b> Esquema de Flujo y almacenamiento del modelo de Témez. ....	16
<b>Figura 3.-</b> Esquema general del Módulo HBV .....	19
<b>Figura 4.-</b> Esquema metodológico para la gestión de la sequía operativa .....	36
<b>Figura 5.-</b> Macrolocalización de la cuenca del Río Tepalcatepec.....	38
<b>Figura 6.-</b> Estaciones climatológicas presentes en la cuenca de estudio .....	54
<b>Figura 7.-</b> Mapa de estaciones principales, después de aplicados los distintos criterios.....	56
<b>Figura 8.-</b> Zona de influencia de estaciones climatológicas mediante polígonos de Thiessen.....	57
<b>Figura 9.-</b> Centroides de microcuencas .....	58
<b>Figura 10.-</b> Mapa de estaciones hidrométricas en cuenca del Río Tepalcatepec, para su acople en EVALHID.....	59
<b>Figura 11.-</b> Estaciones hidrométricas para tercer modelación.....	60
<b>Figura 12.-</b> Escurrimiento mensual de la sub-cuenca 18129.....	62
<b>Figura 13.-</b> Escurrimiento anual de la sub-cuenca 18129.....	62
<b>Figura 14.-</b> Año medio .....	62
<b>Figura 15.-</b> Escurrimiento mensual subcuenca 18280.....	64
<b>Figura 16.-</b> Escurrimiento anual de la sub-cuenca 18280.....	64
<b>Figura 17.-</b> Año Medio.....	64
<b>Figura 18.-</b> Escurrimiento mensual subcuenca 18181.....	66
<b>Figura 19.-</b> Escurrimiento mensual subcuenca 18181.....	66
<b>Figura 20.-</b> Escurrimiento anual para subcuenca 18181.....	66
<b>Figura 21.-</b> Escurrimiento anual para subcuenca 18181.....	66
<b>Figura 22.-</b> Año medio .....	66
<b>Figura 23.-</b> Escurrimiento mensual subcuenca Presa San Juanico.....	68
<b>Figura 24.-</b> Escurrimiento anual.....	68
<b>Figura 25.-</b> Año medio .....	68

<b>Figura 26.-</b> Escurrimiento mensual subcuenca Presa Los Olivos calibración y validación .....	70
<b>Figura 27.-</b> Escurrimiento mensual subcuenca Presa Los Olivos calibración y validación .....	70
<b>Figura 28.-</b> Escurrimiento mensual subcuenca Presa Los Olivos , calibración, validación y del año medio. ....	70
<b>Figura 29.-</b> Escurrimiento mensual subcuenca Presa Los Olivos , calibración, validación y del año medio. ....	70
<b>Figura 30.-</b> Escurrimiento mensual subcuenca Presa Los Olivos , calibración, validación y del año medio. ....	70
<b>Figura 31.-</b> Escurrimiento mensual subcuenca 18201.....	72
<b>Figura 32.-</b> Escurrimientos anuales subcuenca 18201.....	72
<b>Figura 33.-</b> Año medio .....	72
<b>Figura 34.-</b> Escurrimiento mensual subcuenca 18202.....	74
<b>Figura 35.-</b> Escurrimientos anuales subcuenca 18202.....	74
<b>Figura 36.-</b> Año medio subcuenca 18202.....	74
<b>Figura 37.-</b> Escurrimiento mensual subcuenca 18452.....	76
<b>Figura 38.-</b> Escurrimientos anuales subcuenca 18452.....	76
<b>Figura 39.-</b> Año medio .....	76
<b>Figura 40.-</b> Escurrimiento mensual subcuenca 18494.....	78
<b>Figura 41.-</b> Escurrimientos anuales subcuenca 18494.....	78
<b>Figura 42.-</b> Año medio .....	78
<b>Figura 43.-</b> Discretización del acuífero Apatzingán en celdas. ....	81
<b>Figura 44 .-</b> Números asignados por celdas, siendo 0=celda inactiva, 1=celda activa, 2= celda de contorno .....	81
<b>Figura 45.-</b> Hidrogeología acuífero Apatzingán .....	82
<b>Figura 46.-</b> Gráfico de volúmenes observados y calculados del Manantial Buenavista.....	83
<b>Figura 47.-</b> Gráfico de volúmenes observados y calculados del Manantial Apatzingán .....	83

<b>Figura 48.-</b> Gráfico de volúmenes observados y calculados del Manantial Parácuaro.....	83
<b>Figura 49.-</b> Mapa de nuevo mallado para modelación subterránea 2.....	85
<b>Figura 50.-</b> Mapa de nuevo mallado para modelación subterránea 2.....	85
<b>Figura 51.-</b> Distribución de transmisividades .....	85
<b>Figura 52.-</b> Distribución de s.....	85
<b>Figura 53.-</b> Modelo subterráneo de autovalores .....	86
<b>Figura 54.-</b> Acuíferos presentes en la cuenca del Río Tepalcatepec .....	87
<b>Figura 55.-</b> Gráfica de demandas dentro de la CHRT .....	88
<b>Figura 56.-</b> Mapas de localidades y división municipal en la CHRT .....	89
<b>Figura 57.-</b> Mapas de localidades y división municipal en la CHRT .....	89
<b>Figura 58.-</b> Gráfica de población presente.....	89
<b>Figura 59.-</b> Demandas industriales en la CHRT .....	90
<b>Figura 60.-</b> Distritos de riego presentes en la cuenca del Río Tepalcatepec.....	91
<b>Figura 61.-</b> Presas presentes en la cuenca del Río Tepalcatepec .....	92
<b>Figura 62.-</b> Topología de simulación conjunta en SIMGES .....	93
<b>Figura 63.-</b> Calibración presa Vicente Villa Señor .....	94
<b>Figura 64.-</b> Calibración presa Los Olivos.....	94
<b>Figura 65.-</b> Calibración presa San Juanico.....	95
<b>Figura 66.-</b> Calibración presa Chilatán .....	95
<b>Figura 67.-</b> Segunda Calibración Presa Los Olivos .....	97
<b>Figura 68.-</b> Mapa de aportaciones.....	99
<b>Figura 69.-</b> Porcentaje de área afectada con IRSOE para una demanda del 0-25% .....	107
<b>Figura 70.-</b> Porcentaje de área afectada para proyección años 10/2017-03/2019. Demanda 0-25% .....	108
<b>Figura 71.-</b> Porcentaje de área afectada para proyección 10/2017-03/2019 bajo condiciones de sequía. Demanda 0-25% .....	108
<b>Figura 72.-</b> Porcentaje de área afectada con IRSOE para una demanda del 25-50% .....	109

<b>Figura 73.-</b> Porcentaje de área afectada para proyección año 10/2017- 03/2019. Demanda 25-50% .....	110
<b>Figura 74.-</b> Porcentaje de área afectada para proyección año 10/2017-03-2019 bajo condiciones de sequía. Demanda 25-50% .....	110
<b>Figura 75.-</b> Porcentaje de área afectada con IRSOE para una demanda del 50- 75% .....	111
<b>Figura 76.-</b> Porcentaje de área afectada para proyección año 10/2017- 03/2019. Demanda 50-75% .....	112
<b>Figura 77.-</b> Porcentaje de área afectada para proyección año 10-2017-03/2019 bajo condiciones de sequía. Demanda 50-75% .....	112
<b>Figura 78.-</b> Porcentaje de área afectada IRSOE para una demanda del 75-100% .....	113
<b>Figura 79 .-</b> Porcentaje de área afectada para proyección año 10/2017-03/2019. Demanda 75-100% .....	114
<b>Figura 80.-</b> Porcentaje de área afectada para proyección año 10/2017- 03-2019 bajo condiciones de sequía. Demanda 75-100% .....	114
<b>Figura 81.-</b> SPI -12 estación climatológica 16007-Apatzingán .....	115
<b>Figura 82.-</b> SDI-12 Estación Hidrométrica 18094 Los Panches.....	116
<b>Figura 83.-</b> Porcentaje de área afectada con diferente intensidad de sequía meteorológica.....	117
<b>Figura 84.-</b> Porcentaje de área afectada con diferente intensidad de sequía hidrológica.....	118
<b>Figura 85.-</b> Comparativa de porcentaje de área afectada por sequía SDI vs SPI .....	118
<b>Figura 86.-</b> Índices de estado de la CHRT.....	119

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.-</b> Parámetros de modelo HBV .....	19
<b>Tabla 2.-</b> Valores de referencia para el ajuste de cálculo del criterio de Nash Sutcliffe. ....	20
<b>Tabla 3.-</b> Clasificación de eficiencia para correlación de Parajurli .....	21
<b>Tabla 4.-</b> Rangos de evaluación de la consistencia, con el método de Secuencias .....	42
<b>Tabla 5.-</b> Categorías de intensidad de sequía meteorológica .....	51
<b>Tabla 6.-</b> Categorías de intensidad de sequía hidrológica .....	53
<b>Tabla 7.-</b> Selección de estaciones climatológicas .....	55
<b>Tabla 8.-</b> Resultados de parámetros de modelaciones e indicadores de ajuste subcuenca 18129 .....	61
<b>Tabla 9 .-</b> Resultados parámetros e indicadores de ajuste subcuenca 18280. ....	64
<b>Tabla 10.-</b> Resultados, parámetros e indicadores de ajuste subcuenca 18181 ....	66
<b>Tabla 11.-</b> Resultados parámetros e indicadores de ajuste subcuenca de presa San Juanico.....	68
<b>Tabla 12.-</b> Resultados parámetros e indicadores de ajuste subcuenca de presa Los Olivos.....	70
<b>Tabla 13.-</b> Resultados parámetros e indicadores de ajuste subcuenca 18201 .....	72
<b>Tabla 14.-</b> Resultados parámetros e indicadores de ajuste subcuenca 18202 .....	74
<b>Tabla 15.-</b> Resultados parámetros e indicadores de ajuste subcuenca 18452 .....	76
<b>Tabla 16.-</b> Resultados parámetros e indicadores de ajuste subcuenca 18494 .....	78
<b>Tabla 17.-</b> Conductividad y coeficiente de almacenamiento por tipo de roca (USGS,2002).....	79
<b>Tabla 18.-</b> Resumen de resultados de modelación de acuífero Apatzingán .....	84
<b>Tabla 19.-</b> Valores correspondientes de conductividades hidráulica, transmisividad y coeficientes de almacenamiento para cada tipo de roca presente en el acuífero .....	85
<b>Tabla 20.-</b> Demandas en la cuenca del Río Tepalcatepec .....	87
<b>Tabla 21.-</b> Demanda por municipios.....	89
<b>Tabla 22.-</b> Títulos de concesión de tipo industrial en la CHRT .....	90

<b>Tabla 23.-</b> Características presas .....	92
<b>Tabla 24.-</b> Indicadores de ajuste volúmenes de presa.....	98
<b>Tabla 25.-</b> Resumen de estadísticos mensuales y función elegida de normalización de aportaciones.....	100
<b>Tabla 26.-</b> Aportaciones principales y secundarias con su correlación.....	101
<b>Tabla 27.-</b> Resumen de déficit para cada demanda periodo 1999-2001 .....	104
<b>Tabla 28.-</b> Resumen de déficit para cada demanda periodo 2006-2008 .....	105
<b>Tabla 29.-</b> Categorías de Riesgo de Sequía Operativa .....	106

# 1. INTRODUCCIÓN

La sequía que es una característica normal, recurrente en el clima, y por muchos considerada erróneamente como un suceso ocasional y aleatorio(Contreras, 2005), la cual, ha provocado históricamente catástrofes en ámbitos económicos, sociales y naturales.

También puede considerarse como una deficiencia anormal de humedad, que a menudo es la consecuencia de una baja precipitación en una ubicación específica(Mishra y Singh, 2010). Es muy difícil proporcionar una interpretación absoluta de la sequía, porque su significado físico varía según cada región. Por ejemplo, una cantidad de precipitación que causa sequía en una región de clima húmedo, puede no ser lo suficientemente baja para causar sequía en una región de clima árido (Dagbegnon, 2017).

Existen diversas variantes de la sequía, en estas se incluyen, la sequía meteorológica, sequía hidrológica, sequía agrícola, sequía socioeconómica (Mishra y Singh, 2010),

La sequía meteorológica identifica una condición atmosférica caracterizada por una deficiencia temporal de precipitación. El concepto de sequía agrícola es más complejo ya que involucra la humedad del suelo y caracteriza la sequedad de la zona de raíz en las capas de suelo de la superficie. En la escala de cuencas, es probable que las reducciones anormales de la precipitación afecten la superficie procesos hidrológicos tales como escorrentía, flujo base, evapotranspiración e infiltración. Este escenario se conoce como sequía hidrológica (Dagbegnon, 2017).

El efecto general de estos tipos de sequía puede reflejar la disponibilidad de agua dulce para la sociedad, y tal caso se conoce como sequía socioeconómica. Prácticamente, la sequía socioeconómica es la forma más perceptible para la mayoría de la gente porque causa deficiencias en el suministro público de agua, y

afecta ampliamente a la economía. Sin embargo, en realidad, los cuatro tipos de sequía pueden superponerse y dar como resultado impactos significativos en el ecosistema natural, la sociedad y el economía(Heim, 2002).

Por otro lado, los sistemas de recursos hídricos (SRH) son una mezcla de muchos aspectos ambientales, sociales, hidrológicos, económicos y administrativos, su administración requiere amplias e integradas toma de decisiones, que requieren información de las diferentes necesidades de los usuarios y sobre los conflictos económicos y sociales por acceder al agua(Alemu y otros, 2011).

Las Variaciones espaciales y temporales en los componentes del SRH muestran que son funciones de factores de análisis estadísticos, es por esto que los análisis de los sistemas van más allá de los métodos convencionales deterministas(Huang y otros, 2010)

Durante la explotación de los SRH, pueden darse inevitablemente situaciones en las que no sea posible suministrar de forma satisfactoria los usos establecidos, puede darse un fallo del sistema, denominado también sequía operativa. Esta situación puede minimizarse mediante una anticipación de la sequía en el sistema en las fases de planificación y explotación, minimizando los valores esperados de duración y magnitud de sequías, mediante la adopción de reglas de gestión(Sánchez y Andreau, 1999)

Dolling (2001) y Ochoa (2002), hacen una descripción de algunas herramientas informáticas destinadas a resolver distintos problemas del área de la hidrología y de la gestión de los sistemas hídricos, en donde se incluyen modelos desarrollados para el diseño, planificación y explotación de un sistema hídrico. Estos modelos tienen incorporados modelos matemáticos complejos de simulación y optimización para los distintos análisis en los sistemas de recursos hídricos, cuyo objetivo final es ayudar a los tomadores de decisiones para identificar políticas o reglas de operación en la planificación y gestión del agua(Avilés y Solera, 2012).

En este orden de ideas, las políticas y reglas de operación de un SRH son herramientas fundamentales para la toma de decisiones durante la fase de explotación de un sistema, el uso de una regla u otra es determinante para el rendimiento del sistema.

Debe destacarse que no existen reglas o estrategias de gestión universales para el manejo de los recursos hídricos; sin embargo, algunas reglas son extrapolables a sistemas con topologías y propósitos similares, proponiendo una amplia gama de experiencias en el manejo de sistemas complejos que pueden utilizarse como ejemplos para adoptar reglas para un sistema particular(Lund y Guzman, 1999).

Como la sequía es un proceso casi impredecible y acumulativo, ha llevado a la preocupación de los mandatarios en los gobiernos a tener desarrollados e implementados diversos programas para el seguimiento y alerta temprana contra la sequía.

En este contexto, el 10 de enero de 2013 se anunció la formulación del Programa Nacional Contra la Sequía(PRONACOSE, 2013)y que será la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) quien diseñará y liderará el programa.

El planteamiento del PRONACOSE se basa en desarrollos que vienen generándose en diversas partes del mundo donde la prevención de los impactos negativos o la mitigación son prioritarios para reducir los costos que un fenómeno climático como la sequía tiene.

El programa tiene como propósito principal la prevención a través de la alerta oportuna y en segundo la mitigación de las sequías por medio de la actuación temprana para prever, prevenir y actuar de forma anticipada a las eventuales contingencias climatológicas que afecten a la población y la productividad del campo.

Por lo tanto, mediante la consecución del presente trabajo de tesis, se pretende aplicar una metodología cuantitativa y cualitativa para el cálculo de la sequía operativa de la Cuenca Hidrológica del Río Tepalcatepec (CHRT) RH18J, perteneciente a la Región Hidrológica Administrativa RH18 planteando como propósito, aportar datos confiables acerca de la gestión de sequía.

En el sistema que se analizó, considerando la existencia de sequías operativas, además de las sequías hidrológicas que puedan presentarse, se espera que la metodología propuesta ayude a las instituciones a la toma de decisiones, para optimizar la operación y utilización de los recursos presentes en la cuenca con el propósito de poder soportar una sequía hidrológica operando correctamente la infraestructura presente.

El PRONACOSE propone en su Plan General Maestro Estratégico de Investigación establecer convenios con Instituciones Científicas Nacionales e Internacionales interesadas en el tema de la sequía, es por esto que, mediante la consecución de este proyecto se logre una vinculación con el programa, ubicándose nuestros resultados dentro de las necesidades por el Gobierno Federal como prioritarias.

## **2. OBJETIVO**

Generar un Modelo de Gestión Hídrica que permita evaluar la sequía operativa, en la CHRT.

### **Objetivos particulares:**

Generar la calibración y validación de un modelo hidrológico lluvia-escorrentía que permita obtener series de escurrimiento superficial restituidos a régimen natural al introducir datos de precipitación mensual.

Generar un modelo subterráneo de los acuíferos presentes en la cuenca que permita obtener su funcionamiento ante la presencia de acciones elementales y recarga del acuífero.

Generar un modelo de gestión hídrica calibrado y validado que muestre el funcionamiento histórico y futuro de la cuenca, ante la presencia de estructuras, demandas consuntivas y no consuntivas y las acciones del modelo hidrológico y subterráneo.

Obtener un modelo estocástico con múltiples series hidrológicas sintéticas que permita la evaluación de un gran número de opciones de escurrimientos con mismos parámetros estadísticos.

Evaluación del riesgo de sequía operativa en series históricas que permitan implementar medidas de mitigación a futuro.

### **3. HIPÓTESIS**

Será posible estimar la probabilidad de ocurrencia de sequías operativas en la CHRT mediante un modelo de Gestión Hídrica, el cual, a su vez, permitirá estimar una correcta planificación de los recursos hídricos en la cuenca.

## 4. JUSTIFICACIÓN

En México, existe el reto de optimizar la gestión del agua y a éste se suma la presencia recurrente de fenómenos hidrometeorológicos extremos, que alteran los ciclos de precipitación y la disponibilidad del recurso. En este sentido, se requiere construir un esquema de gestión del riesgo frente a la vulnerabilidad climatológica natural y a los efectos del cambio climático global.

Mediante el desarrollo del presente trabajo se plantea generar un modelo que permita implementar un sistema de alerta temprana. Los resultados obtenidos mediante este modelo constituirán un estudio con base científica de la evaluación de la sequía operativa en la cuenca del Río Tepalcatepec con un alto nivel de confianza, que aportará elementos para monitorear, entender y predecir la sequía.

De este modo, los primeros beneficiados serán los usuarios del agua en la zona de estudio, a quienes les permitirá prever estos eventos y planear mejor el uso del agua, para fines urbanos, agrícolas y pecuarios.

Por otro lado, este proyecto pretende servir como sustento para la toma de mejores decisiones de las autoridades responsables de la administración del agua, que les permita establecer los sistemas de advertencia temprana y las medidas de prevención necesarias ante un posible evento de sequía operativa.

## 5. ANTECEDENTES

Desde sus inicios el desarrollo de muchos de los SRH ha estado orientado a mitigar los efectos de las sequías, como es la construcción de obras de regulación, la incorporación de nuevas fuentes de abastecimiento, el uso de acuíferos y medidas similares, todas ellas como respuesta a la escasez de agua ya sea temporal o local. Sin embargo, ello no quiere decir que en esos sistemas exista consciencia de la probabilidad de ocurrencia de sequías, ni se conozcan sus propiedades y menos que haya algún mecanismo explícito para enfrentarlas en el futuro.

Algunos países se han preocupado por la evaluación de las sequías, a continuación, se explican algunos ejemplos de los trabajos realizados por las naciones para monitorear y evaluar este fenómeno. En 1995 fue creado el Monitor de Sequía de Estados Unidos con el objetivo de dar seguimiento y mostrar la magnitud y la extensión espacial de la sequía y sus impactos a lo largo y ancho de los Estados Unidos. Su inicio relativamente lento y la complejidad de sus impactos han motivado la búsqueda de nuevas metodologías de evaluación. Posteriormente, en 2002 fue necesario un esfuerzo conjunto entre los tres países de América del Norte (Canadá, México y Estados Unidos), con el principal objetivo de monitorear eventos climáticos extremos sobre el territorio de los tres países. De igual manera en Australia también se han preocupado por estudiar las sequías, ya que los periodos secos son muy comunes, en particular en las áreas marginales lejos de las costas. El país se encuentra ubicado directamente bajo el cinturón subtropical de alta presión, en la mayor parte del país se experimenta precipitación baja, pero sumamente variable. El método adoptado para este país ha sido, trabajar con déciles de precipitación que funcionan como indicadores. Inglaterra no ha sido la excepción, Moore (1996) expone la aplicación de un sistema soporte a la decisión (SSD) para la gestión anticipada de sequías en el río Támesis; el SSD genera lluvias sintéticas de acuerdo con unas curvas patrón asociadas a diferentes niveles de riesgo; dichas lluvias se usan como entradas para un modelo lluvia-escorrentía con el fin de obtener las respectivas series de caudal que se utilizan luego como datos

para el modelo de simulación del sistema de recursos hídricos; a continuación se hace un análisis estadístico de los resultados del modelo de simulación, para realizar las evaluaciones de riesgo asociadas a los escenarios hidrológicos considerados.

Palmer (1965) define a la sequía meteorológica como el intervalo de tiempo, generalmente con una duración del orden de meses o años, durante el cual el aporte de humedad en un determinado lugar cae consistentemente por debajo de lo climatológicamente esperado o del aporte de humedad climatológicamente apropiado y (Valiente, 2001) expresa que se basa en datos climáticos y es una expresión de la desviación de la precipitación respecto a la media durante un periodo de tiempo determinado.

Ante la dificultad de establecer una duración y magnitud del déficit pluviométrico válidas para áreas geográficas, algunas definiciones de sequía meteorológica optan por no especificar umbrales fijos. La sequía hidrológica involucra el periodo durante el cual los caudales son inadecuados para satisfacer los usos establecidos bajo un determinado sistema de gestión de aguas.

Mckee (1993) han propuesto el índice de Precipitación Estandarizado IPE (SPI por sus siglas en ingles Standarized Precipitacion Index) para definir y dar seguimiento a la sequía como un indicador basado en la probabilidad de lluvia, en cualquier periodo de tiempo. El cálculo del IPE para cualquier lugar se basa en los registros de precipitaciones a largo plazo durante el periodo deseado. Este registro de datos a largo plazo se ajusta a una distribución normal, de manera que el IPE medio para el lugar y periodo sea cero.

Linsley (1958) define a la sequía hidrológica como el periodo durante el cual los caudales son inadecuados para satisfacer los usos establecidos bajo un determinado sistema de gestión de aguas, la PMPMS (2014) menciona la sequía

hidrológica como la disminución en la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas en un sistema hidráulico o hidrológico durante un plazo.

Nalbantis (2008) desarrolló el Índice Hidrológico de Sequía (SDI por sus siglas en inglés) con el propósito de determinar a través del tiempo el déficit de caudales para una corriente y en un periodo de tiempo dado. De acuerdo con su metodología, la relación de la sequía en cuatro aspectos, severidad-duración-frecuencia- área, se reduce a solo dos, severidad contra frecuencia.

Como uno de los objetivos de los Planes de Sequía en España para proporcionar los medios para anticipar los efectos de sequía, Ferrer (2007) ha propuesto el índice de estado (IS, por sus siglas en inglés State Index), resultado de combinar distintas variables hidrometeorológicas obtenidas de un sistema de monitoreo con un carácter hidrológico, para cada cuenca los gestores correspondientes deben seleccionar un conjunto de variables que mejor representan los recursos hídricos para diferentes unidades de demanda en la cuenca usando principalmente los valores del almacenamiento de las presas, los niveles piezométricos el caudal de los ríos a régimen natural y la precipitación.

En la historia de México los efectos de la sequía se han palpado intensamente durante los últimos años, y a pesar de las devastadoras consecuencias el conocimiento sobre ellas aun es relativamente limitado (Escalante y Reyes, 2002). Velasco Y Aparicio, (2004) aplica el método de Índice de Precipitación Estandarizado y el Índice de Severidad de Sequías de Palmer en la cuenca del Río Bravo, estos índices pueden utilizarse para caracterizar las sequías utilizando indicadores de probabilidad de precipitaciones en periodos de tiempo, este autor se adentra un poco más a un análisis cuantitativo, pero aplicando un método basado sólo en la lluvia, como un índice de la eficacia temporal de la precipitación, por otro lado Ortega y Velasco (2013) hace un análisis de la vulnerabilidad actual de la sequía en México por medio de un análisis cualitativo caracterizado por la situación

geográfica, densidad demográfica, intensidad de la actividad económica, pero sin llegar a un análisis cuantitativo.

La mayoría de los métodos y procedimientos propuestos hoy en día para la mitigación de sequías admiten que independientemente de las probabilidades de ocurrencia de sequías de diferentes características lo importante es saber qué debe hacerse si se presentan, es decir, estar preparados para enfrentarlas (Sánchez & Andreu, 1999).

Avilés y Solera (2012) hacen una detallada descripción de los diferentes aspectos relacionados con la planificación y la gestión de SRH además de que presenta una muestra de los modelos matemáticos que han sido propuestos en el tema de planificación y gestión de sequías. Sánchez y Andreu, (1999) presentan una metodología de gestión basada en la estimación del riesgo de fallo en sistemas complejos de recursos hídricos.

Haro y otros (2014), estudia las dificultades de utilizar únicamente un sistema de indicadores basado en datos actuales y pasados para evaluar el riesgo de sequía en los sistemas de yacimientos regulados dentro de un año. Propone el uso complementario de una metodología general de evaluación de riesgos para anticipar el estado futuro probable del sistema y definir el escenario actual de sequía. Muestra cómo el uso complementario de un sistema de monitoreo y un sistema de apoyo a la decisión de evaluación de riesgo puede mejorar el proceso de detección de sequía permitiendo a los administradores de agua optimizar la selección de medidas de mitigación y minimizar la probabilidad de reacción exagerada durante una situación de sequía.

Las áreas que presentarían valores de alta vulnerabilidad ante las sequías tienen correspondencia con las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, así como los lugares donde se concentra la población y las actividades económicas, como en el centro del país. Los estados de Baja California, Coahuila, Jalisco, Colima, Nayarit,

Querétaro, Guanajuato, Zacatecas, Michoacán, Sonora e Hidalgo tendrían más del 68% de su superficie con un alto grado de vulnerabilidad a la desertificación (Pérez, 2016)

En México las investigaciones acerca de la predicción de las sequías son escasas. Existen estaciones climatológicas e hidrométricas, pero cuentan con poca información. Lo que hace necesario implementar una metodología con el propósito de obtener valores predictivos de la recurrencia de sequías en algunas regiones de México y que serían de un gran valor estratégico. Es por ello que mediante el desarrollo del presente proyecto se desarrollará un método cuantitativo, basado en estudios realizados en algunos países, que cuentan con buena calidad de datos y con una gran veteranía en este tipo de estudios aplicado a la cuenca del río Tepalcatepec. A partir de la aplicación de la metodología del Sistema de Soporte a la Decisión AQUATOOL (SSD AQUATOOL) para el cálculo de sequías operativas se obtendrá un Índice de Riesgo de Sequía Operativa Estandarizado (IRSOE).

. Además, se ha aplicado el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI por sus siglas en inglés, Standardized Precipitation Index) y el Índice Estandarizado de Sequía (SDI por sus siglas en Inglés: Standardized Drought Index), para la cuenca del Río Tepalcatepec para el cálculo de las sequías meteorológicas e hidrológicas en la zona y realizar una espacialización de los resultados para representarlos tanto de manera temporal como espacial, con esto se busca dar una interpretación general del estado de sequía en la cuenca, ya que según Dagbegnon, (2017) el significado físico de la sequía varía dependiendo de cada región.

### **5.1 Modelos y herramientas utilizados**

Para poder seleccionar un modelo y las herramientas con las que se trabajará, se deben de tomar en cuenta distintos puntos: la disponibilidad de softwares con los que se cuenta, su compatibilidad y la cantidad y calidad de datos que se tienen.

Existe gran variedad de modelos lluvia-escorrimento, algunos de pocos parámetros como Témez, el cual consta sólo de 4, mientras que existen otros más complejos como Sacramento que considera hasta 16 parámetros. Debido a que en México es complicado contar con todos los datos para la modelación de un modelo de muchos parámetros, es preferible utilizar un modelo con pocos parámetros para reducir la incertidumbre en la modelación, es por ello que se ha seleccionado el modelo de Témez para el presente proyecto.

Para realizar la modelación superficial se seleccionó la herramienta EVALHID, ya que contiene el modelo de Témez y se tiene acceso al software, por otra parte esta herramienta forma parte de un sistema soporte decisión (SSD) llamado AQUATOOL (Andreu y otros, 1996), el cual cuenta con herramientas para la modelación subterránea y para la gestión. Este SSD contiene la herramienta AQUIVAL para la modelación subterránea y SIMGES para la modelación conjunta (gestión), adicionalmente contiene la herramienta SIMRISK, para la modelación de la gestión de la sequía. Al utilizar las herramientas de un mismo SSD se eliminan los problemas de compatibilidad. A continuación, se describen de manera detallada cada uno de los modelos a emplearse.

### 5.1.1 EVALHID

La evaluación del recurso hídrico es un aspecto fundamental de la planificación y gestión de recursos hídricos. Básicamente existen dos metodologías para evaluar el recurso hídrico: la restitución a régimen natural y la modelación precipitación-escorrentía. Ambas metodologías suelen ser complementarias y necesarias. El programa EVALUACIÓN de los recursos HÍDRICOS (EVALHID) es un módulo informático para el desarrollo de Modelos Precipitación-Escorrentía (MPE) en cuencas complejas y con el objetivo de evaluar la cantidad de recurso hídrico que producen las mismas. El módulo consta de varios tipos de modelos que se pueden escoger en función de los datos disponibles, la complejidad de la cuenca y la práctica del usuario en el desarrollo y calibración de modelos hidrológicos. Todos los modelos disponibles son del tipo agregado con aplicación semi-distribuida. Este

programa está integrado dentro del Sistema Soporte de Decisión AQUATOOL para el desarrollo de modelos relativos a la planificación y gestión de recursos hídricos(Paredes-Arquiola y otros., 2012).

Este modelo que se plantea es conceptual agregado de aplicación semi-distribuida. Esto quiere decir que una cuenca que quiera ser modelada se subdivide en subcuencas y en cada subcuenca se plantea uno de los modelos disponibles en el programa.

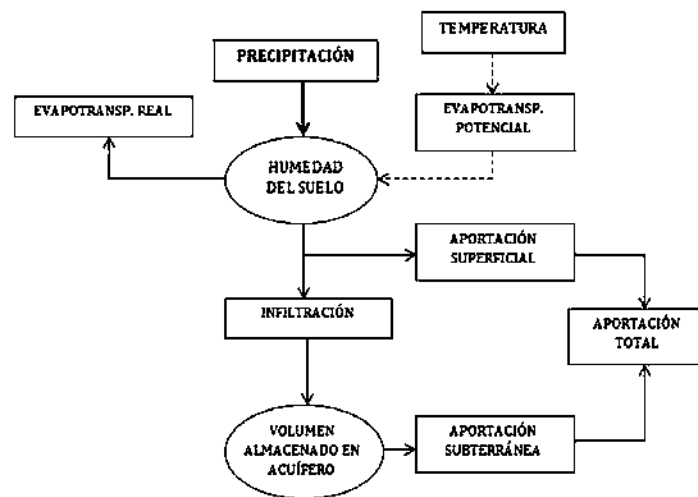
Para cada subcuenca a modelar es necesario datos de series temporales de precipitación, evapotranspiración potencial (ETP) y la superficie de la subcuenca. Si se quiere desarrollar un modelo de nieve es necesario disponer de series temporales de la temperatura del aire. Como es obvio las series temporales deben de ser del mismo período. En general, también es necesaria la disponibilidad de datos aforados, restituidos a régimen natural, que permitan la calibración de los parámetros del modelo. Estos datos observados no son indispensables para la simulación del modelo.

En resumen, las características principales del programa son las siguientes:

- Disponibilidad de diferentes MPE aplicables según diferentes factores.
- También cuenta con varios modelos para estimar la escorrentía nival.
- Permite el desarrollo de modelos para grandes cuencas y sistemas complejos.
- Escala temporal configurable y definida por el usuario.
- Posibilidad de modelar, para las subcuencas seleccionadas, exclusivamente la parte superficial estimando la infiltración como una salida del programa.
- Acople con el modelo de simulación de la gestión SIMGES y uso del mismo para la modelación de la parte subterránea.

*Modelo de Temez.*

El modelo hidrológico de Temez (1977) es un modelo agrupado de precipitación-escorrentía, que se ha utilizado para la planificación del agua en España (Estrela y otros, 1999; Bejarano y otros 2010); (Belmar y otros, 2011); (González-Zeas y otros, 2012); (Chavez-Jimenez y otros, 2013); (García-Barrón y otros, 2015); (Jódar y otros, 2017). El modelo opera realizando balances de humedad entre los distintos procesos de transporte de agua que tienen lugar en un sistema hidrológico durante las diferentes fases del ciclo hidrológico. Todo el proceso está gobernado por el principio de continuidad y de balance de masas, y regulado por leyes específicas de reparto y transferencia entre los distintos términos del balance. La siguiente figura representa el ciclo hidrológico simulado.



**Figura 1.-** Esquema conceptual de la simulación del ciclo hidrológico del modelo

El modelo realiza una valoración global, ya que no considera la distribución espacial de las variables y parámetros que intervienen en los cálculos, que se sustituyen por un valor medio, por lo que se limita su aplicación a cuencas pequeñas o intermedias en las que existe cierta homogeneidad climática, edafológica y geológica. Para su aplicación en cuencas de mayor tamaño es necesario realizar

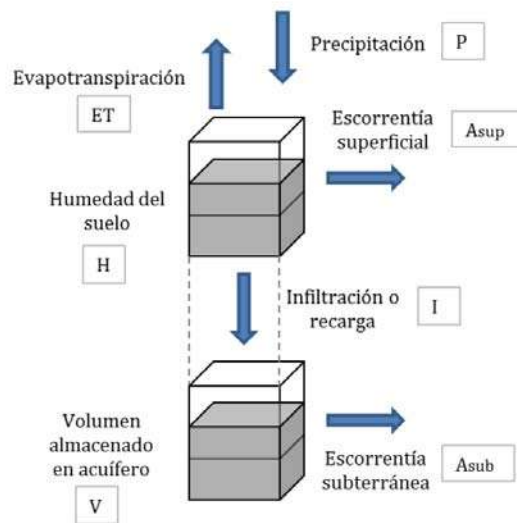
una subdivisión en cuencas más pequeñas, por lo que el modelo puede funcionar como modelo semi-agregado.

El intervalo temporal más empleado es el mensual, aunque como el desarrollo teórico del modelo es de índole general, en principio éste puede aplicarse a cualquier intervalo de tiempo (horario, diario, mensual, anual), debiéndose verificar que los períodos temporales empleados proporcionen una respuesta coherente con la realidad física del sistema.

El modelo considera el terreno dividido en dos zonas:

- Una zona superior, no saturada, en cuyos poros coexisten agua y aire, y su contenido de agua es asimilable a la humedad del suelo.
- Una zona inferior o acuífero, la cual se encuentra saturada y funciona como un almacenamiento subterráneo que desagua a la red de drenaje superficial.

El balance de humedad que realiza el modelo está constituido por el flujo entrante de precipitación ( $P_i$ ), el cual se reparte entre una serie de flujos salientes, de flujos intermedios y de almacenamientos intermedios. Los distintos componentes de flujos y almacenamientos se ilustran en la siguiente figura.



**Figura 2.-** Esquema de Flujo y almacenamiento del modelo de Tézmez.

Flujos de entrada: la precipitación (P)

- Flujos de salida: la evapotranspiración real (E), la aportación superficial (A<sub>sup</sub>) y la aportación de origen subterráneo (A<sub>sub</sub>)

- Flujos intermedios: únicamente la infiltración (I), agua que pasa de la parte superior del suelo a la zona inferior o acuífero, donde se considera que el tiempo de paso de este flujo por el suelo es inferior al tiempo de simulación (el mes), por lo que la infiltración se identifica con la recarga al acuífero durante el mes "t" (R<sub>t</sub>).

- Almacenamientos intermedios: la humedad del suelo (H<sub>t</sub>), y el volumen almacenado en el acuífero (V<sub>t</sub>)

En el modelo de Témez, el agua que procede de la precipitación (P) se distribuye de tres formas diferentes:

- El excedente (T), que a su vez se descompone en un flujo de infiltración al acuífero desde la zona superior del suelo (I<sub>t</sub>), y en un flujo que discurre superficialmente (A<sub>sup</sub>). Este flujo superficial se evacua a través del cauce dentro del período presente de simulación. Parte del agua almacenada en la zona inferior o acuífero desagua en el intervalo de tiempo presente (A<sub>subt</sub>) y la otra parte permanece dicho almacenamiento subterráneo para salir en meses posteriores.

- La evapotranspiración real (E<sub>t</sub>) de una parte o de toda la humedad almacenada en la zona superior del suelo (H<sub>t</sub>)

- La humedad del suelo (H<sub>t</sub>) que se almacena en la zona superior del suelo, cuyo límite es la capacidad máxima de almacenamiento hídrico del (H<sub>maxt</sub>).

### *Modelo HBV*

El modelo hidrológico HBV es un modelo conceptual y agregado de precipitación escurrentía ampliamente empleado en previsiones hidrológicas y en estudios de balance hídrico, que ha sido aplicado en más de 30 países. Pertenece a la clase de modelos que tratan de abarcar los procesos más importantes de generación de escurrentía empleando una estructura simple y robusta, y un

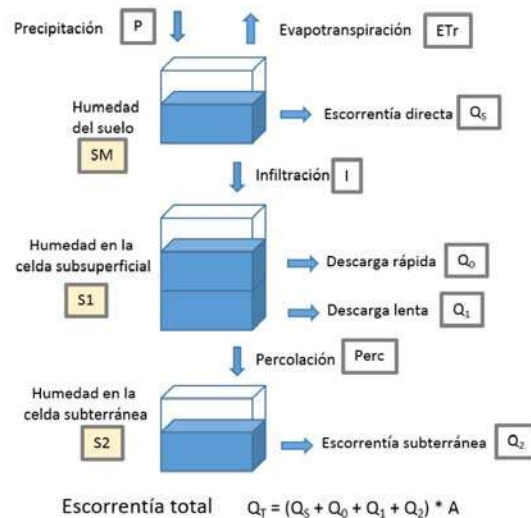
pequeño número de parámetros. Fue originariamente desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico (SMHI) para predecir la escorrentía a centrales hidroeléctricas en 1970 (Bergström, 1976; Bergström, 1992), pero el alcance de sus aplicaciones se ha ido incrementando continuamente. El modelo ha estado sujeto a modificaciones a lo largo del tiempo y, aunque su filosofía básica no ha cambiado, existen nuevos códigos que se encuentran en constante desarrollo por diferentes grupos y que varían en su complejidad.

El modelo consta de cuatro módulos o rutinas principales:

- Módulo de fusión y acumulación de nieve,
- Módulo de humedad del suelo y precipitación efectiva,
- Módulo de evapotranspiración
- Módulo de estimación de escorrentía.

El modelo puede ejecutarse a escala temporal diaria o mensual y los datos de entrada necesarios incluyen: series de precipitación y temperatura observadas en cada paso de tiempo y estimaciones a largo plazo de la temperatura y evapotranspiración media mensual.

En la siguiente figura, se ilustran los procesos generales de la versión utilizada del HBV. Esta incluye un módulo que procesa los datos de precipitación como lluvia o como nieve basándose en la temperatura de cada paso de tiempo. La lluvia y la nieve fundida (si existe) son procesadas en el módulo de humedad del suelo donde se evalúa la precipitación efectiva que contribuye a la escorrentía superficial. La parte restante de la precipitación contribuye a la humedad almacenada en el suelo, que a su vez puede evaporarse siempre y cuando el contenido de agua existente en el subsuelo sea lo suficientemente grande. La salida principal del modelo es la escorrentía total en el punto de desagüe de la cuenca, que consta de tres componentes: escorrentía superficial, interflujo y flujo base (contribución del flujo subterráneo)(Paredes-Arquiola y otros, 2012).



**Figura 3.- Esquema general del Módulo HBV**

La escorrentía total es la suma de cada uno de los módulos mencionados anteriormente calculados en mm, para posteriormente ser multiplicados por el área de la cuenca y obtener el caudal o volumen total de aportación.

$$Q_t = (Q_{s_t} + Q_{0_t} + Q_{1_t} + Q_{2_t})A$$

La siguiente tabla es un resumen de los parámetros del modelo:

**Tabla 1.- Parámetros de modelo HBV**

Zona	Parámetro	Descripción	Unidad
Suelo	FC	Capacidad de campo	mm
	$\beta$	Coeficiente de forma para la infiltración	-
	PWP	Punto de marchitez de la vegetación	mm
Celda subsuperficial	Lmax	Umbral de descarga rápida (tanque superior)	mm
	K0	Coeficiente de descarga rápida (tanque superior)	-
	K1	coeficiente de recesión (tanque superior)	-
Celda profunda	kperc	Coeficiente de percolación	-
	k2	Coeficiente de recesión (tanque inferior)	-

#### Indicadores de ajuste

Estos modelos a su vez hacen uso de un mecanismo de optimización (The Shuffled Complex Evolution) (SCE-UA) para Visual Basic en Excel para hacer llegar sus diferentes parámetros a sus valores óptimos. El cual fue desarrollado por Duan, Sorooshian, y Gupta, (1992) en la Universidad de Arizona, Estados Unidos, y su eficiencia ha sido ampliamente reconocida ante problemas de calibración de

modelos hidrológicos con un elevado número de parámetros y una alta no linealidad (Lerma y otros, 2015).

Estos modelos hacen uso de indicadores de ajuste con funciones objetivo que nos ayudarán a medir la calidad del ajuste de los gastos observados, frente a los calculados con EVALHID.

#### 1) Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS)

Esta función objetivo es muy usada en proyectos de simulación hidrológica superficial (Nash y Sutcliffe, 1970); (Bren y Lane, 2014) es un error cuadrático medio que da un mayor peso a los errores grande. El valor de NS varía de -1 a 1. Un valor NS=1 significa que el ajuste es perfecto. Un valor de cero significa que el error es del mismo orden de magnitud que la varianza de los datos observados, por lo que la media de los datos observados tendría una capacidad de predicción similar al modelo. Valores inferiores a cero implican que la media tiene una capacidad de predicción más alta que el modelo, lo que implica el mal funcionamiento del modelo.

$$F1 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [Q_{obs}(t) - Q_{obs}(t)]} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde:

n=número de meses de la calibración

Q<sub>sim</sub>=Flujo simulado en el intervalo de tiempo t.

Q<sub>obs</sub>=Flujo observado en el intervalo de tiempo t.

**Tabla 2.-** Valores de referencia para el ajuste de cálculo del criterio de Nash Sutcliffe.

E	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno

0.6-0.8	Muy Bueno
>0.8	Excelente

2) El coeficiente de Nash-Sutcliffe de la transformación logarítmica del flujo (lnNS)

Este coeficiente da mayor peso a los errores durante flujos escasos. Para reducir el problema de las diferencias cuadráticas y la consecuente sensibilidad a valores extremos, el coeficiente NS se calcula con valores logarítmicos de valores simulados y observados. A través de esa transformación logarítmica del flujo, los picos se achatan y los valores más bajos se mantienen más o menos al mismo nivel. Los valores se clasifican de acuerdo a la tabla 2.

$$F2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [lnQ_{sim}(t) - lnQ_{obs}(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [lnQ_{obs}(t) - lnQ_{obs}(t)]} \quad (\text{Ec.4.2})$$

3) Coeficiente de correlación de Pearson ( $r^2$ ).

El coeficiente de correlación de Pearson (1920), es una medida estadística que mide la fuerza y la dirección lineal entre dos variables aleatorias, se ha aplicado a varios índices en estadísticas, como análisis y clasificación de datos (Tyagi, 2015), análisis de datos (Pavanello y otros, 2015), agrupamiento, toma de decisiones (Liao y otros, 2015), análisis financiero (Kim y otros, 2015) e investigación biológica (Puth y otros, 2014), este coeficiente también mide la covarianza de valores observados y simulados sin penalización por sesgo. El valor de este coeficiente varía de -1 a 1.

Toma el valor de 1 cuando los puntos de datos describen de una perfecta línea recta con pendiente positiva, también es llamado como correlación completa positiva. En cambio, cuando el coeficiente toma un valor de -1 este momento es denominado como correlación completa negativa. Mientras tanto un valor cercano a cero indica que las variables de gastos simulados y observados no están correlacionados linealmente. Los valores se categorizan de acuerdo a la clasificación de Paraluji y otros (2007)(Tabla 3).

**Tabla 3.- Clasificación de eficiencia para correlación de Parajurli**

R <sup>2</sup>	Ajuste
<0	Insuficiente
0 – 0.24	Pobre
0.4 – 0.6	Razonable
0.6 – 0.8	Bueno
>0.8	Muy Bueno
>0.8	Excelente

#### 4) Simetría de la simulación (SS)

Es una medida de ajuste que mide la simetría entre la simulación media y la observación media. Los valores cercanos a 1 son los que muestran un buen ajuste. Es ampliamente usada en hidrología en España para comparar la simetría del ajuste entre la observación promedio y la simulación promedio (Pedro-Monzonís y otros, 2016)

$$F4 = 1 - \left[ \max \left( \frac{Q_{sim}}{Q_{obs}}; \frac{Q_{obs}}{Q_{sim}} \right) - 1 \right]^2 \quad (\text{Ec. 4.3})$$

### 5.1.2 AQUIVAL

AQUIVAL es un módulo incorporado al sistema soporte de decisión para la planificación y gestión de recursos hidráulicos incluyendo uso conjunto, llamado AQUATOL (Andreau y otros., 1991), desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) (España). Este módulo permite la integración de modelos de acuíferos previamente calibrados en la simulación de recursos hidráulicos.

AQUIVAL ayuda al usuario en la modelización por el método de los autovalores (Sahuquillo, 1983), facilitando la entrada de datos mediante un entorno gráfico. La principal característica de este modelo de parámetros distribuidos es la eficiencia computacional, que reduce el tiempo y la memoria utilizados. Con ello se puede incluir el modelo de flujo subterráneo en un modelo complejo de gestión y simular muchas alternativas para largos periodos de simulación(Andreau y Sahuquillo, 1987).

El método de los autovalores da lugar a una solución explícita en el tiempo. La definición de “acciones elementales” y “parámetros de control”, contribuye a una mayor eficiencia computacional del método. Mediante las “acciones elementales se definen los tipos de acciones a las que se somete el acuífero, como pueden ser recarga por lluvia, bombeos, retornos de riego, etc. Con los “parámetros de control” se definen las variables cuyo seguimiento puede ser interesante, ya sea a efectos de información o a efectos de influir en la gestión que se realice del acuífero.

Los datos hidrodinámicos necesarios para aplicar el método descrito necesitan de una calibración, que puede realizarse mediante modelos matemáticos en diferencias finitas o elementos finitos. Esto es debido a que el modelo de autovalores no es, en principio, eficaz en la obtención de esta calibración.

Una de las principales ventajas de la utilización de AQUIVAL, es que se pueden usar sus resultados, ya que crea un conjunto de archivos con el formato adecuado para que el programa “SIMGES” pueda leerlo(UPV, 2011).

### 5.1.3 SIMGES

El modelo SIMGES es un modelo general para la Simulación de la Gestión de Cuencas, o sistemas de recursos hidráulicos complejos, en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial.

El modelo admite cualquier configuración dentro de unos límites impuestos únicamente por capacidades de hardware, y por tanto es utilizable para cualquier esquema de recursos hidráulicos. La simulación se efectúa a nivel mensual y reproduce a la escala de detalle espacial que el usuario desee el flujo del agua a través del sistema.

Para los subsistemas superficiales el flujo es calculado simplemente por continuidad o balance, mientras que para los subsistemas subterráneos o acuíferos el flujo es simulado mediante modelos de celda, unicelulares o pluricelulares, según convenga, o incluso mediante modelos distribuidos de flujo lineal. Se tiene asimismo en cuenta en la simulación las pérdidas por evaporación y filtración en embalses y cauces, así como las relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas.

La gestión de los recursos hidráulicos se efectúa mediante reglas de operación tendentes a mantener un nivel similar de llenado en los embalses a partir de las curvas características (elevación-área, elevación-capacidades) propias de cada embalse.

Dichas curvas son las reglas de explotación propiamente dichas y son suministradas por el usuario del modelo. Se admite la definición de caudales mínimos ecológicos, así como de diferentes prioridades de los usuarios para el aprovechamiento del agua.

La simulación y gestión del sistema superficial se efectúan a un tiempo mediante el uso de un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo. Dicho algoritmo se encarga de determinar el flujo en el sistema tratando de satisfacer al máximo los objetivos múltiples de minimización de déficits, y de máxima adaptación a las curvas de volúmenes objetivo de embalse y objetivos de producción hidroeléctrica.

Los resultados del modelo incluyen la evolución de todas las variables de interés a nivel mensual, a nivel anual, valores medios del período de simulación, así como garantías. Todo ello permite que el modelo pueda ser utilizado, entre otras finalidades para:

- Determinar las garantías que se obtienen para distintas hipótesis de infraestructura y de evolución de demandas, así como para distintas reglas de explotación de la cuenca.
- Determinación de reglas de explotación más adecuadas para unos niveles exigidos de garantías.
- Determinación de beneficios o perjuicios derivados de la alteración de prioridades de usos del agua.
- Determinación de capacidades de embalse, de conducciones, y de instalaciones de bombeo para unos niveles de demanda y de garantía dados.

Como ya se ha dicho, la simulación y gestión del subsistema superficial se van a resolver simultáneamente mediante el uso de un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo.

El "esquema del usuario" confeccionado en la manera arriba esbozada constituye una red de flujo. Pero dicha red no cumple el requisito de ser conservativa, pues no es cerrada y hay nudos en los que hay almacenamiento (los correspondientes a los embalses). Por tanto, la primera tarea del modelo después de la lectura de datos es la adaptación del esquema del usuario como una red de

flujo conservativo. Para ello es necesario, por una parte, el establecimiento de unos nudos de "cierre" de la red, y por otra, el desdoblamiento de cada elemento tipo en un sub-esquema de arcos y nudos tal que aseguren que la simulación del comportamiento hidráulico y de gestión del elemento es adecuada. El resultado es una "red de flujo interna", mucho más compleja que la del usuario, que ya es conservativa, y que es la que manejará el modelo sin trascendencia exterior al usuario (Andreau y otros, 2011).

Desde su creación, el modelo SIMGES (Andreau y otros, 1991) ha cumplido con múltiples usos en la Unión Europea, en el área de la economía ambiental del agua en la cuenca del Río Duero en España (Vicente y otros, 2016), determinación de recursos hídricos disponibles, aplicado en la cuenca del Río Júcar en España (Pedro-Monzonís y otros, 2015), así como en cambio climático en la cuenca del río Llobregat (Pouget y otros, 2012), entre otros obteniendo excelentes resultados en la gestión de recursos hídricos.

Los sistemas de recursos hídricos con frecuencia experimentan sequías severas, los modelos genéricos de simulación pueden proporcionar información útil para desarrollar medidas de mitigación de la sequía. Sulis y Sechi (2013) hacen uso de cinco diferentes modelos haciendo hincapié en la aplicación de modelos genéricos de simulación a un sistema hídrico de múltiples depósitos y usos múltiples aplicado a un sistema de recursos hídricos en el sur de Italia, donde las sequías frecuentes en las últimas dos décadas han requerido el uso de restricciones de suministro de usuarios temporales e insostenibles. En particular, los modelos AQUATOOL (Universidad Politécnica de Valencia), MODSIM (Universidad Estatal de Colorado), RIBASIM (DELTARES), WARGI-SIM (Universidad de Cagliari) y WEAP (Instituto Ambiental de Estocolmo), estos modelos realizan un análisis preliminar que considera series y esquemas paralelos simples y también evalúa la posibilidad de planes alternativos y políticas operativas en sistemas de agua reales complejos.

Cada modelo tiene sus propias características y utiliza diferentes enfoques para definir liberaciones de recursos de embalses y asignación a centros de demanda. La comparación y aplicación del modelo propuesto no identifica en detalle todas las características de cada modelo, sino que proporciona información sobre cómo estos modelos de simulación genéricos implementan y evalúan diferentes reglas de operación.

Sulis y Sechi (2013) concluyen que cualquier modelo proporciona buenos resultados, el uso de cada uno de ellos dependerá de la disponibilidad de datos y del propio modelo. Para este proyecto se usará el modelo de SIMGES por contar con las herramientas necesarias para su funcionamiento, así como el contacto para la obtención de una licencia de estudiante fácilmente.

#### 5.1.4 MASHWIN

El modelo de análisis de series hidrológicas (MASHWIN) es un modelo de análisis estocástico de tipo mensual, destinado al estudio de series temporales de aportaciones pertenecientes a un sistema hidráulico. Su utilidad consiste en ser una potente herramienta de cálculo y análisis para la definición de la estructura estocástica que mejor se ajusta a un conjunto de series temporales de aportaciones. Lo cual ayuda a conocer mejor el sistema hidráulico analizado y es un resultado previo para la generación de series sintéticas condicionadas, que se realizará más adelante con otros modelos, aunque también puede realizarse con este.

El modelo MASHWIN combina; para la realización del análisis de las series temporales de aportaciones correspondientes a un sistema hidráulico; una modelación periódica estocástica mensual mediante una modelación autoregresiva de media móvil (ARMA) multivariada, con una desagregación espacial mensual por el modelo condensado de Lane. Además, el modelo realiza una gran variedad de tests de ajuste para todas las fases de análisis.

El modelo ha sido fraccionado en un conjunto de aplicaciones que permiten realizar un análisis detallado paso a paso de un conjunto de series hidrológicas. Y que a su vez es coordinado en todos los pasos parciales por una interface de usuario que permite acceder automáticamente a todas las fases de análisis (UPV; )(Suárez-Almiñana y otros, 2017).

El modelo calcula tres grupos de estadísticos:

- a) Estadísticos básicos, conformados por las medias, las desviaciones típicas y los coeficientes de sesgo de las series propiamente dichas.
- b) Estadísticos de sequía, conformados por las medias, máximos y desviaciones típicas de la duración, la intensidad y la magnitud de las sequias para distintos umbrales.
- c) Estadísticos de almacenamiento, que consisten en las capacidades de embalse de las series de caudales para diferentes umbrales, así como el rango ajustado, el rango ajustado reescalado y el coeficiente de Hurst para cada serie de caudales.

### **Normalización de series**

Esta fase consiste en transformar las series de caudales originales ( $Q_{v,\tau}$  o  $Q_v$ , según sean las series mensuales o anuales) mediante los distintos tipos de funciones indicadas en las ecuaciones (4.4-4.7), con el fin de que se conviertan en series normalizadas originales ( $x_{v,\tau}$  o según sean las series mensuales o anuales), es decir, que adopten una distribución de probabilidad normal.

$$x_{v,\tau} = \sqrt{Q_{v,\tau}} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

$$x_{v,\tau} = \ln(Q_{v,\tau} + 1) \quad (\text{Ec. 4.5})$$

$$x_{v,\tau} = \ln[\ln(Q_{v,\tau} + 1) + 1] \quad (\text{Ec. 4.6})$$

$$x_{v,\tau} = (Q_{v,\tau} + a)^b \quad (\text{Ec. 4.7})$$

Cuando las series son mensuales se tiene la posibilidad de aplicar funciones normalizadoras diferentes a los distintos meses. La sola aplicación de estas funciones no garantiza la normalidad de las series transformadas. Para verificar esta condición, se calcula el coeficiente de sesgo de las series normalizadas y, mediante las ecuaciones 4.8 y 4.9, se evalúa el intervalo de normalidad del sesgo.

$$[-3.9601 N^{-.4598}, +3.9601 N^{-.4598}] \text{ para } N < 150 \quad (\text{Ec. 4.8})$$

$$\left[ -1.96 \sqrt{\frac{6}{N}} \right], \left[ 1.96 \sqrt{\frac{6}{N}} \right] \text{ para } N \geq 150 \quad (\text{Ec. 4.9})$$

Donde N es el número de años en la serie, aun cuando esta sea mensual.

Se considera estadísticamente con una distribución normal, si el valor del coeficiente de sesgo de la serie de caudales está dentro de los intervalos antes mencionados.

### **Ajuste en series de Fourier.**

Cuando se analizan series mensuales de caudales, es normal encontrar que la variación de sus medias y desviaciones típicas mensuales a lo largo del año presenta periodicidades; es decir, su representación gráfica puede asemejarse de algún modo a funciones del tipo sinusoidal. Esta propiedad hace posible que dichos estadísticos puedan ser representados por funciones aproximadas mediante el desarrollo de series de Fourier, con el objetivo de reducir el número global de parámetros del modelo estocástico. No hay que perder de vista que los estadísticos que se emplean para tipificar las series de caudales constituyen parámetros de la modelación: por cada serie (mensual) existen 12 medias y 12 desviaciones típicas, es decir 24 parámetros. Con el ajuste de Fourier, esos parámetros se pueden reducir incluso hasta una sexta parte.

Con la aplicación de esta técnica se busca pues, respetar hasta donde sea razonable el principio de parsimonia estadística, al cual debe prestársele especial atención sobre todo cuando se trata de un modelo multivariado con un número importante de estaciones.

### **Tipificación de las series y correlaciones.-**

Después de tener las series de caudales normalizadas se procede a tipificarlas mediante la ecuación 4.10, con el fin de eliminar las periodicidades (en las series mensuales) y llevarlas a una misma “escala”, ya que así resultan más evidentes y explicables las diferencias entre ellas. De esta manera entonces, se pueden evaluar las correlaciones entre las distintas series, las cuales sirven esencialmente para establecer el tipo de modelación, a partir de las matrices de correlación cruzada y de las funciones de autocorrelación.

$$\text{S. mensuales: } z_{v,\tau} = \frac{x_{v,\tau} - \bar{x}_\tau}{\bar{s}_{x_\tau}} \quad (\text{Ec. 4.10})$$

### **Modelos estocásticos multivariados**

El programa dispone de tres tipos de modelos estocásticos para la generación de series sintéticas:

- a) Tipo ARMA
- b) Desagregación espacial
- c) Desagregación temporal

#### *a) Modelos tipo ARMA*

El programa tiene tres modelos que pertenecen al grupo de los modelos Autorregresivos de Media Móvil de orden (p,q), es decir con p parámetros autorregresivos y q parámetros de media móvil: ARMA (p,q). Estos modelos tienden a conservar los estadísticos de primer orden de las series muestrales: media y desviación típica y las primeras p autocorrelaciones. Debido a estas características resultan bastante útiles cuando se trata de generar series de caudales futuras equiprobables de la serie histórica.

El programa emplea modelos ARMA de parámetros constantes cuya formulación general está dada por la ecuación 4.11. Cuando las series son mensuales, los modelos de parámetros constantes, en oposición a los de parámetros periódicos, resultan más consecuentes con el principio de parsimonia estadística (menos parámetros) y en la mayoría de los casos resultan suficientemente adecuados para la modelación de dichas series.

$$\{Z\}_t = [\Phi]_1\{Z\}_{t-1} + [\Phi]_2\{Z\}_{t-2} + \dots + [\Phi]_p\{Z\}_{t-p} + [\theta]_0\{\varepsilon\}_t - [\theta]_1\{\varepsilon\}_{t-1} - \dots - [\theta]_q\{\varepsilon\}_{t-q} \quad (\text{Ec 4.11})$$

Donde:  $\{Z\}_t$ : Vector de caudales del periodo (mes o año) t  
 $[\Phi]_p$ : Matriz de parámetros autorregresivos.  
 $[\theta]_q$ : Matris de parámetros de media móvil.  
 $\{\varepsilon\}_t$ : Vector de residuos del periodo t (valores aleatorios independientes entre sí y normalmente distribuidos con media cero y varianza unitaria).

### Modelo AR(1)

Es el modelo autorregresivo puro más simple. Representa el caudal del intervalo de tiempo t como una función del caudal del periodo precedente t-1 y una variable aleatoria independiente y normalmente distribuida de media cero y varianza unitaria,  $\varepsilon$ .

$$\{Z\}_t = [\Phi]_1\{Z\}_{t-1} + [\theta]_0\{\varepsilon\}_t \quad (\text{Ec. 4.12})$$

### Modelo AR(2)

En este modelo, (Ec. 4.13), el caudal de un periodo t es la función de los caudales de los dos periodos anteriores t-1 y t-2, y de una variable aleatoria,  $\varepsilon$ , normalmente distribuida con media cero, varianza unitaria y no correlacionada.

$$\{Z\}_t = [\Phi]_1\{Z\}_{t-1} + [\Phi]_2\{Z\}_{t-2} + [\theta]_0\{\varepsilon\}_t \quad (\text{Ec. 4.13})$$

### Modelo ARMA (1,1)

A diferencia de los dos anteriores, este modelo, (Ec. 4.14), incluye una componente de media móvil.

$$\{Z\}_t = [\Phi]_1\{Z\}_{t-1} + [\theta]_0\{\varepsilon\}_t - [\theta]_1\{\varepsilon\}_{t-1} \quad (\text{Ec. 4.14})$$

## Modelación de las series residuales

Debido a que la selección del mejor modelo para generación se basa parcialmente en un conjunto de pruebas de bondad de ajuste sobre las series residuales, el programa obtiene dichas series a partir de los modelos previamente calibrados y les calcula los estadísticos que se requieran para esas pruebas, con el fin de que el modelador disponga de toda esta información para tomar su decisión.

Las series residuales se obtienen de las ecuaciones matriciales correspondientes

Modelo AR (1)

$$\{\varepsilon\}_t = \theta_0^{-1}(\{Z\}_t - [\phi]_1\{Z\}_{t-1}) \quad (\text{Ec. 4.15})$$

Modelo AR (2)

$$\{\varepsilon\}_t = \theta_0^{-1}(\{Z\}_t - [\phi]_1\{Z\}_{t-1} - [\phi]_2\{Z\}_{t-2}) \quad (\text{Ec. 4.16})$$

Modelo AR (2)

$$\{\varepsilon\}_t = \theta_0^{-1}(\{Z\}_t - [\phi]_1\{Z\}_{t-1} + [\theta]_1\{\varepsilon\}_{t-1}) \quad (\text{Ec. 4.17})$$

### *b) Modelo de desagregación espacial*

Otro de los modelos disponibles en el programa es el modelo de DESAGREGACIÓN ESPACIAL DE LANE (Salas, 1980). Este modelo es especialmente para problemas multivariados con un gran número de estaciones, es decir, casos en los cuales se tendría un alto número de parámetros si fuesen abordados sólo con una modelación multivariada tipo ARMA.

## Formulación del modelo

Éste es un modelo lineal que da como resultado series de caudales, Y, en un conjunto de estaciones secundarias, a partir de un conjunto de caudales, X, provenientes de unas cuantas estaciones principales. Para la calibración del modelo se requieren series históricas de caudal con el mismo número de datos en todas las estaciones, y correspondientes a un mismo periodo. La Ec. 15 muestra la forma del modelo de Lane.

$$\{Y\}_t = [A]\{X\}_t + [B]\{\varepsilon\}_t + [C]\{Y\}_{t-1} \quad (\text{Ec. 4.18})$$

Donde:

Y: Vector de los caudales de las estaciones secundarias.

X: Vector de los caudales de las estaciones principales.

$\varepsilon$ : Vectores de los valores aleatorios distribuidos normalmente con media cero, desviación típica unitaria e independientes en el tiempo.

**A, B y C**: Matrices de parámetros.

El modelo puede trabajar a escala mensual o anual.

El modelo de desagregación espacial de Lane está diseñado para preservar las medias y las varianzas de las series históricas en las series generadas, así como las correlaciones de orden cero entre estas últimas.

#### *d) Modelo de desagregación temporal*

El programa dispone también de un modelo para desagregar series de caudales anuales en sus respectivas series de caudales mensuales, es decir, de un modelo de desagregación temporal. En particular, el programa trabaja con el MODELO CONDENSADO DE DESAGREGACIÓN TEMPORAL DE LANE (Salas, 1980).

### 5.1.5 SIMRISK

El modelo SimRisk es un modelo general para la Simulación de la Gestión de Cuencas, o sistemas de recursos hidráulicos complejos, en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización o consumo y de dispositivos de recarga artificial.

El modelo ha sido desarrollado en base al modelo SIMGES (Andreau y otros, 2011), pero ha sido diseñado para su uso como modelo para la estimación del riesgo en la gestión a corto plazo de Sistemas Complejos de Recursos Hídricos. Es por ello que, aunque la definición física de los esquemas es muy similar a la de SIMGES, la filosofía del modelo y los resultados proporcionados son totalmente distintos.

Para mantener la compatibilidad con los modelos de gestión diseñados para SIMGES, el modelo SIMRISK ha sido diseñado para que acepte la totalidad de los datos que precisa el primer modelo. Además de aquellos, el modelo SIMRISK necesita una serie de datos adicionales que se introducen en archivos separados. El modelo SIMRISK amplía el alcance del anterior modelo con la repetición de numerosas simulaciones con un periodo de tiempo de longitud dada y múltiples series hidrológicas. En base a estas simulaciones confecciona índices estadísticos que evalúan la situación de riesgo hidrológico del sistema.

Al igual que SIMGES, el modelo SIMRISK admite cualquier configuración dentro de los límites de impuestos por la capacidad del hardware, y por tanto es utilizable para cualquier esquema de recursos hidráulicos.

La simulación se efectúa a nivel mensual y reproduce a la escala de detalle espacial que el usuario desee el flujo del agua a través del sistema. Para los subsistemas superficiales el flujo es calculado simplemente por continuidad o balance, mientras que para los subsistemas subterráneos o acuíferos el flujo es simulado mediante modelos de celda, uní o pluricelulares, según convenga, o incluso mediante modelos distribuidos de flujo lineal. Se tiene asimismo en cuenta en la simulación las pérdidas por evaporación y filtración en embalses y cauces, así como las relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas.

Para la obtención de estadísticos de riesgo el modelo SIMRISK precisa realizar un número elevado de simulaciones con un periodo de tiempo de longitud

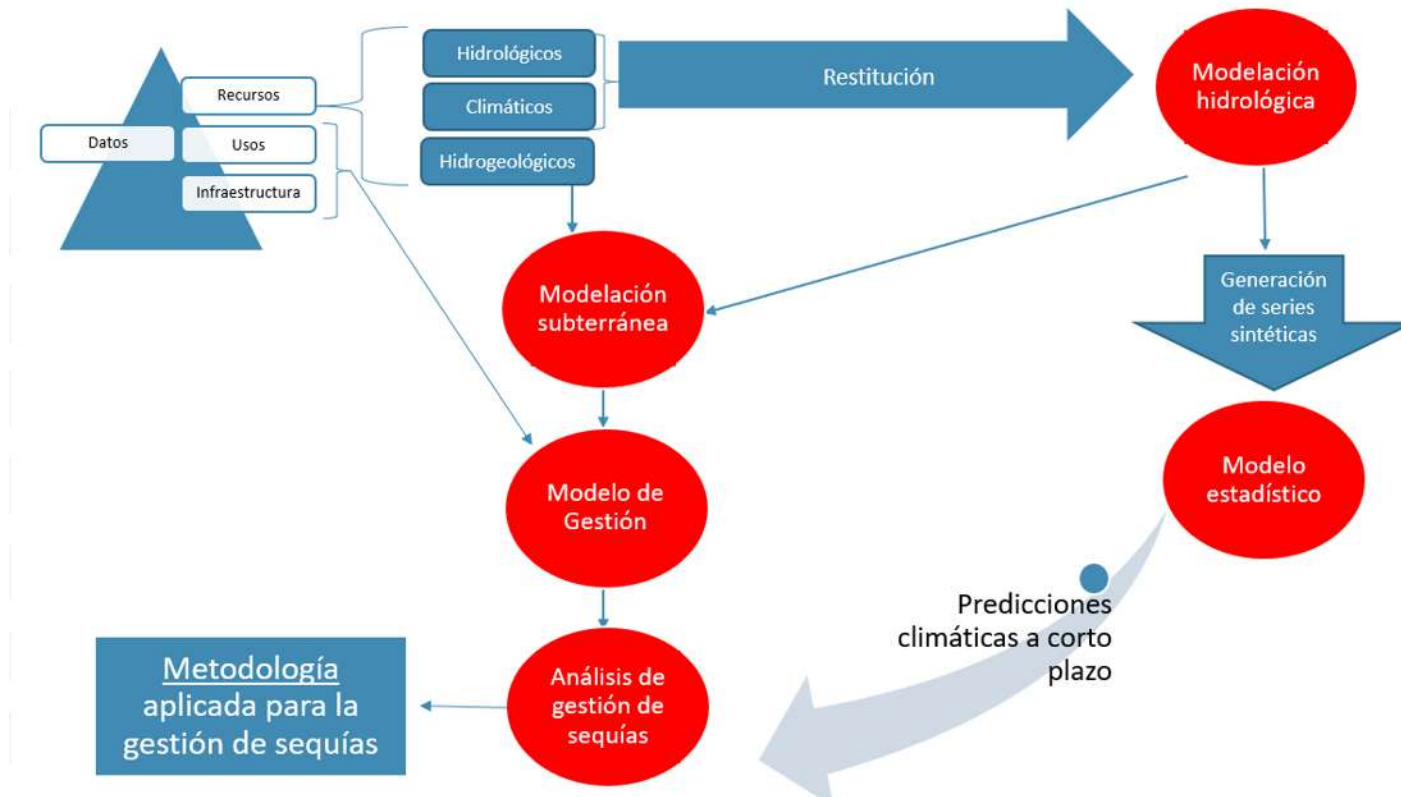
dada y múltiples series hidrológicas. Y en base a estas simulaciones confecciona índices estadísticos que evalúan la situación de riesgo hidrológico del sistema.

Otra característica de este modelo es la capacidad que da al usuario de asignar reducciones en el suministro, para facilitar el estudio alternativas de anticipación a situaciones de escasez de agua (Andreu y otros, 2001).

Este software ha sido usado para planeación y manejo de recursos de agua tomando en cuenta el cambio climático en proyectos de la unión europea (Suárez-Almiñana y otros, 2017), así como para el manejo óptimo de cuencas en condiciones de sequía (Haro y otros, 2014). Motivo por el cual se propone el uso de este software para la determinación de la sequía operativa y lograr un manejo óptimo de la cuenca del Río Tepalcatepec.

## 6 METODOLOGÍA

Para llevar a cabo este estudio, se seguirá el esquema metodológico propuesto en la siguiente figura:



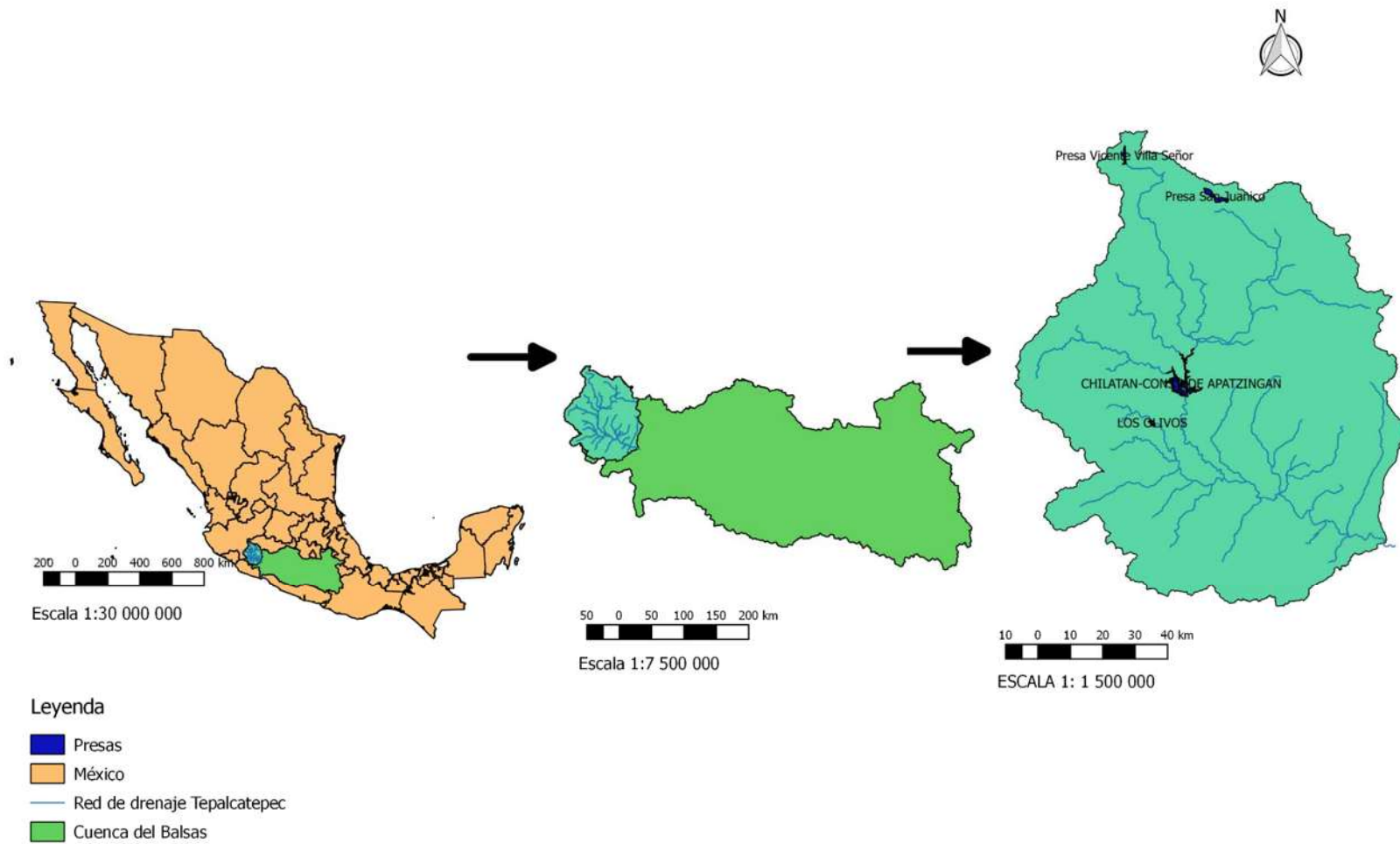
*Figura 4.- Esquema metodológico para la gestión de la sequía operativa*

### **6.1.-Análisis de la cuenca de estudio:**

La Región Hidrológica Balsas(RH18) incluye en su totalidad al Estado de Morelos y parcialmente a los Estados de Tlaxcala (75%), Puebla (55%), México (36%), Oaxaca (9%), Guerrero (63%), Michoacán (62%) y Jalisco (4%), así como muy pequeñas porciones del Distrito Federal y del Estado de Veracruz (CONAGUA, 2013). La región está compuesta por 15 subcuencas, entre ellas la del río Tepalcatepec que comprende el nacimiento de los escurrimientos del río Quitupan en el cerro de la Tinaja y hasta la estación hidrométrica con clave los Panches, localizada en las coordenadas geográficas 102° 13' 37" de longitud Oeste y 18° 53' 10" de latitud Norte.

La CHRT (RH18J) forma parte de la Región Hidrológica Administrativa del Balsas, tiene una superficie de aportación de 11,718.72 km<sup>2</sup>, y se encuentra delimitada por las siguientes regiones y cuencas hidrológicas: al norte por la Región Hidrológica 12 Lerma-Santiago; al Sur por la Región Hidrológica número 17 Costa de Michoacán; al Este por la cuenca hidrológica Río Cupatitzio; y al Oeste por la Región Hidrológica número 16 Armería-Coahuayana (Pérez, 2016).

En este proceso se realiza la recolección de información básica necesaria para el análisis de la cuenca. Para ello se requiere de mapas vectoriales o de tipo ráster, como, por ejemplo: los mapas de clima, geología, edafología, uso de suelo, delimitación de acuíferos y de cuencas ayudándonos de Sistemas de Información Geográfica (SIG), que nos será de gran ayuda para la catalogación de la información.



**Figura 5.-** Macrolocalización de la cuenca del Río Tepalcatepec

## **6.2.- Recopilación de datos**

### **6.2.1 Estaciones climatológicas**

Las ubicaciones de las estaciones climatológicas establecidas se obtienen del archivo de estaciones climatológicas espacial proporcionado por la CONAGUA, mientras tanto para la obtención de datos de precipitación y temperatura de las estaciones se utilizó la base de datos de clima computarizado (CLICOM, 2016), actualizando y completando a través de información proporcionada directamente por CONAGUA.

Una vez obtenida la lista de estaciones, se seleccionan las estaciones principales procurando que estas cubran la superficie total de la cuenca. Para la selección se utiliza un método de discretización de acuerdo a distintos pesos en sus variables (cantidad de años con datos, datos recientes y porcentaje de vacíos).

Ya seleccionadas las estaciones a utilizar y divididas en principales y secundarias, se realiza el llenado de vacíos de las mismas. Para el cual se utilizan los métodos de Regresión Lineal Simple, múltiple y el método del inverso de la distancia euclidiana al cuadrado, dependiendo las condiciones de los datos y el método que más se adecue.

### **6.2.2.- Estaciones hidrométricas**

Son las estaciones que miden los caudales que pasan por los ríos. La información de las estaciones hidrométricas se obtuvo del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS).

Las estaciones seleccionadas son las ubicadas dentro del parteaguas de la CHRT, dentro de estas, las principales son aquellas que estén registrando información de una corriente natural sobre el cauce principal de la cuenca. Por otro lado, las estaciones que registren información de canales u otras obras de regulación serán utilizadas para la restitución a régimen natural de las estaciones principales.

### 6.2.3.-Niveles piezométricos de los acuíferos y volúmenes aforados de manantiales.

Los niveles piezométricos son importantes para la realización del modelo subterráneo, ya que con estos valores se realiza la calibración del mismo, esta información se obtendrá a través del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA). Para el caso particular de este proyecto, se realizará la modelación del acuífero Apatzingán por el método de Autovalores con el software AQUIVAL y los otros cuatro acuíferos presentes se modelarán como unicelulares. Para la modelación del acuífero Apatzingán se realizará la calibración con gastos que se tienen aforados de los manantiales presentes en Apatzingán, Buenavista y Parácuaro.

### 6.2.4.- Presas

La obtención de las características y funcionamiento del vaso de las presas dentro de la zona en estudio para conocer los volúmenes que llegan a ellas y que se almacenan y poder realizar la restitución a régimen natural, se realizó a través del Departamento de Agua Superficial de la CONAGUA y del Sistema de Seguridad de Presas (2015).

### 6.2.5.- Demanda urbana

Utilizando sistemas de información geográfica y la información vectorial de centros de población obtenida del portal de la comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2016) se ubican todas las poblaciones dentro del parteaguas de cuenca en estudio.

Una vez ubicadas las localidades que se encuentran dentro de la cuenca se obtienen los datos de poblaciones de cada una de ellas a partir de los censos de población y vivienda de INEGI. Datos con los cuales se realizan las proyecciones de población, utilizando cuatro métodos, el aritmético, geométrico, mínimos cuadrados y exponencial. Posteriormente se selecciona el método que mejor ajuste

al comportamiento y proyección de los datos históricos de población. Teniendo las proyecciones de las poblaciones, se puede obtener la proyección de la demanda urbana de agua, por lo que se necesitan caracterizar los valores de dotación per cápita recomendado por la CONAGUA.

#### 6.2.6.- Demanda industrial

Los datos de la demanda industrial en la cuenca del río Tepalcatepec se obtienen de la base de datos del REPDA perteneciente a la CONAGUA. Datos que muestran los títulos de concesión y permisos de descarga.

#### 6.2.7 Demanda agrícola

Las demandas de agua del sector agrícola, así como de los distintos planes de riego, se obtendrán de los registros en la base de datos de los distritos de riego 097 “Lázaro Cárdenas”, 099 “Quitupán- Magdalena” y 013 “Estado de Jalisco”, así como de la base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) al igual que en el caso de demandas agrícolas ya que la información de cada uno de los pozos de bombeo especifica el tipo de servicio que ofrece (Industrial, agrícola, urbano). Información que será utilizada en el modelo de gestión hídrica.

### **6.3. Análisis y validación estadística de los datos hidrométricos y meteorológicos.**

Las características estadísticas de las series hidrológicas, como la media, desviación estándar y los coeficientes de correlación serial, se afectan cuando la serie presenta tendencia en la media o en la varianza, o cuando ocurren saltos negativos o positivos; tales anomalías son producidas por la pérdida de homogeneidad y la consistencia, Es necesario realizar la validación de los datos obtenidos, antes de ser implementados en los modelos a utilizar lo cual se lleva a cabo mediante las herramientas siguientes (Escalante y Reyes, 2002):

*-Prueba estadística de Helmer*

*-Prueba de secuencias*

*-Prueba de independencia de eventos (Límites de Anderson)*

### 6.3.1 Prueba estadística de Helmer.-

Esta prueba es sencilla y consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento, de la serie con respecto a su valor medio. Si una desviación de un cierto signo es seguida de otra del mismo signo, entonces se dice que se forma una secuencia S, de lo contrario, se considera como un cambio C.

La serie se considera homogénea si cumple:

$$-\sqrt{n_j - 1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n_j - 1} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

### 6.3.2. Prueba de secuencias

Para este método se debe obtener la media de la precipitación anual y posteriormente se asigna el valor negativo a cada año que tenga una precipitación anual por debajo de la media y se asigna un valor positivo cuando la precipitación es mayor a esta.

El siguiente paso es contabilizar el número de cambio de pendientes y después comparar este valor con el de la tabla siguiente:

**Tabla 4.- Rangos de evaluación de la consistencia, con el método de Secuencias**

DATOS	$\mu$	DATOS	$\mu$
12	5 a 8	32	13 a 20
14	5 a 10	34	14 a 21
16	6 a 11	36	15 a 22
18	7 a 12	38	16 a 23
20	8 a 13	40	16 a 25
22	9 a 14	50	22 a 30
24	9 a 16	60	26 a 36
26	10 a 17	70	31 a 41
28	11 a 18	80	35 a 47
30	12 a 19	100	45 a 47

### 6.3.3. Prueba de independencia de eventos

Para que se pueda llevar a cabo el análisis de frecuencias se requiere que la muestra de la serie esté compuesta por variables aleatorias. Para probarlo se aplica la prueba de independencia de eventos, la cual hace uso del coeficiente de autocorrelación serial  $r_k^j$  para diferentes tiempos de retraso  $k$ .

La expresión para obtener el coeficiente de autocorrelación serial de retraso  $k$  es:

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (Q_i^j - Q^j)(Q_{i+k}^j - Q^j)}{\sum_{i=1}^{n_j} (Q_i^j - Q^j)^2}; \text{ para } r_0^j=1 \text{ y } k=1, 2, \frac{n_j}{3} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Donde:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n x = \frac{Q_i^j}{n_j} \quad (\text{Ec. 5.3})$$

La gráfica de los valores estimados para  $r_k^j$  (ordenadas) contra los tiempos de retraso  $k$  (abscisas), junto con sus correspondientes límites de confianza, se llama correlograma de la muestra.

Además, los límites al 95% de confianza para  $r_k^j$  se pueden obtener como:

$$r_k^j(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96 \sqrt{n_j - k - 1}}{n_j - k} \quad (\text{Ec. 5.4})$$

Si solo el 10% de los valores  $r_k^j$  sobrepasan los límites de confianza, se dice que la serie es independiente y por lo tanto es una variable que sigue las leyes de la probabilidad (Escalante y Reyes, 2002).

#### 6.3.4. Llenado de datos

Este proceso tiene finalidad de llenar los espacios vacíos en las series de datos climatológicos con datos razonables y consistentes.

Existen diversos métodos para el llenado de datos para este estudio se utilizaron los siguientes:

- a) Método de la U.S. National Weather Service.

Este procedimiento ha sido verificado tanto teórica como empíricamente y considera que el dato faltante en una cierta estación A, puede ser estimado en base a los datos observados en las estaciones circundantes. El método puede ser aplicado para estimar valores diarios, mensuales o anuales faltantes.

Para la aplicación de este método es necesario contar con la distancia euclidiana entre cada estación. Entendiendo como “distancia euclidiana” a la distancia ordinaria entre dos puntos deducida con el teorema de Pitágoras. Siendo así necesario conocer coordenadas de cada estación en un espacio tridimensional con el fin de realizar una matriz de distancias. Por último, la distancia euclidiana queda definida con la siguiente expresión:

$$[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2] \quad (\text{Ec. 5.5})$$

$$\text{Dist. Eucli.} = \sqrt{[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2]} \quad (\text{Ec.5.6})$$

Donde

$$\begin{aligned} x_i, y_i, z_i &\rightarrow \text{Coordenadas } (x, y, z) \text{ de la estación "i"} \\ x_j, y_j, z_j &\rightarrow \text{Coordenadas } (x, y, z) \text{ de la estación "j"} \end{aligned}$$

Ahora con la matriz de distancias euclidianas, se continúa con la elaboración de la matriz del inverso de la distancia al cuadrado.

Para el llenado de datos faltantes de la estación principal se necesita calcular un promedio ponderado por cada estación, es decir se asigna un peso a cada estación auxiliar en función del valor del inverso de la distancia al cuadrado entre la sumatoria de los inversos de la distancia euclidiana al cuadrado de las estaciones auxiliares. Por último se sumarán los productos calculados entre el peso de cada estación por el valor de precipitación de un intervalo de tiempo dado. Se puede resumir el proceso con las siguientes expresiones (Campos, 1998):

$$W_i = \frac{(\text{Inverso Distancia}_i)^2}{\sum_{n=1}^n (\text{Inverso Distancia}_i)^2} \quad (\text{Ec. 5.7}) \quad \text{Dato faltante} = \sum_{k=0}^n (W_i * P_i) \quad (\text{Ec. 5.8})$$

Dónde:

$W_i$  → Promedio ponderado o peso de la estación  $i$

$P_i$  → Precipitación del tiempo  $i$

$i = 1 \dots n$  → Número de estaciones auxiliares para el llenado.

## 6.4. Modelación

Ya que se ha terminado el validado y llenado de datos faltantes correspondientes a la precipitación, se pasa esta información al modelo lluvia-escorrimento para obtener los gastos generados por las lluvias en las subcuencas de modelación.

### Restitución a régimen natural (RN)

Para la calibración de los modelos lluvia-escorrimento o también llamados precipitación-escorrentía (PE), la información de las aportaciones a régimen natural es fundamental; y por ello hay que tener en cuenta que los caudales aforados en las estaciones hidrométricas no registran la condición natural del cauce, además, que las alteraciones sobre el río están siendo causadas por actuaciones que se han realizado o modificado durante las últimas décadas, y se manifiestan en los cambios estadísticos de las series de gasto.

Para la restitución de datos hidrológicos a régimen natural, existen una variedad de métodos, y la determinación del más adecuado dependerá de la información y de los medios disponibles. Por ello es recomendable considerar todos los métodos para los que se disponga de información y los medios de cálculo con el objeto de poder contrastar los resultados y disponer de más elementos de juicio.

Si los datos de las estaciones hidrométricas proceden de lugares y periodos en donde la actividad humana en la cuenca aguas arriba no ha tenido una significativa relación a los caudales aportados en los ríos podría considerarse que esos datos están a régimen natural. Normalmente esto puede ser válido para cuencas de cabecera, sin embargo, a medida que se va descendiendo sobre el cauce, el grado de alteración crece y se hace completamente necesaria la restitución.

El caudal natural de un río puede verse afectado por diversas acciones, tanto en la parte superficial como también sobre las aguas subterráneas. Las

alteraciones más frecuentes se citan en Sahuquillo y otros (2011) las cuales son las siguientes:

Detracción de caudal en los ríos a través de tomas en presas, azudes, bombeos, etc.

- Vertido de caudales al río, generalmente procedentes del sobrante de los usos del agua.
- Almacenamiento y desembalse de agua en las presas de regulación.
- Aumento de las pérdidas naturales por evaporación directa del espejo de agua generado en los embalses.
- Detracción o aportación de aguas subterráneas debido a bombeos, recarga artificial, o como consecuencia de alteraciones en el sistema superficial como aumento de la recarga por infiltración desde embalses o por excedentes de riego.

Las alteraciones más complicadas de restituir normalmente son las registradas por el uso de aguas subterráneas debido a que con frecuencia se desconoce la existencia de los datos de caudales extraídos de los acuíferos, así como de la relación entre las aguas subterráneas y los ríos. Y a pesar de que se pudieran conocer esta información, se requiere de la formulación de un modelo de flujo en el acuífero para la restitución.

#### *1) Estimación de datos para la restitución a régimen natural.*

Las series hidrométricas de aforo en los ríos frecuentemente tienen huecos que se necesitan completar o que no cubren del todo el periodo de tiempo para el que se realiza la restitución. Además, suele ser necesario reconstruir series en lugares en que no existen estaciones de aforo, y es muy habitual que no existan datos aforados para muchas de las causantes necesarias para la restitución. Por lo tanto, es necesario recurrir a diversos análisis estadísticos, así como a estimaciones

simples de datos. La restitución a RN es conceptualmente un proceso sencillo, que consiste en la adición o sustracción de los datos de caudales extraídos o aportados al caudal del río, lo que matemáticamente puede escribirse (Marizza, 2003):

$$N = A + T + B - V - Q - R + E \pm S \quad (\text{Ec. 5.9})$$

Donde:

N = Caudal en régimen natural para el periodo considerado

A = Caudal aforado

T = Caudal derivado o trasvasado por tomas aguas arriba

B = Caudal extraído por bombeo en acuíferos conectados

V = Son los retornos de aguas arriba

Q = Caudal trasvasado de otras cuencas

R = Caudal aportado por recarga adicional en acuíferos

E = Caudal evaporado en embalses y masas de agua nuevas

S = Caudal almacenado o liberado por embalses.

A pesar de que la ecuación de restitución se vea muy sencilla, en ocasiones esta se hace inabordable por la gran ausencia de datos necesarios para realizar el cálculo. En dichas ocasiones se suele recurrir a métodos de estimación que estarán basados en la información conocida sobre el proceso. A continuación, se presentan la forma en cómo se estiman los datos para la restitución de la alteración sufrida a causa de los embalses y de los retornos de los usos consuntivos.

## *2) Alteraciones causadas por embalses*

Quizá esta causa sea de las que menos problemas supone al restituir a régimen natural. La razón es que los embalses suelen medir el nivel de almacenamiento y las sueltas controladas por los organismos operadores. Además, suele conocerse con buena precisión la relación entre la cota del nivel del agua en el embalse y el volumen almacenado, esto normalmente a escala diaria o mensual, así que por diferencia entre lo almacenado al inicio y al final del mes se puede calcular el volumen acumulado o suministrado por el embalse.

Otra de las alteraciones a causa de los embalses se produce por la evaporación directa desde el almacenamiento y a las filtraciones que pueden generarse en el vaso. En la mayoría de las ocasiones estos valores son de una magnitud muy inferior a la de las aportaciones naturales, por lo que no se comete un gran error al no considerarlos. En caso de que sea necesario su cálculo puede ser de la siguiente manera, a través de la ecuación de balance del embalse (Sahuquillo y otros, 2011) :

$$V_f = V_i + A + P_f - E - S_c - S_v \quad (\text{Ec. 5.10})$$

Donde:

$V_i$  y  $V_f$  = Volumen de inicio y final del embalse en el mes

$A$  = Aportación al embalse de la cuenca aguas arriba

$P_f$  = Perdidas por filtración

$E$  = Perdidas por evaporación

$S$  = Seltas del embalse, que pueden ser controladas como las tomas ( $S_c$ ) y sueltas por derrames o aliviaderos no controladas ( $S_v$ )

### 3) Alteraciones causadas por retornos superficiales aguas arriba.

Como se mencionó anteriormente existen dificultades para estimar las extracciones de caudal en el río, tanto para usos urbanos como agrícolas. El retorno se le llama al caudal que regresa al cause después de ser utilizada el agua y viene siendo una parte del caudal derivado del cauce por lo que la dificultad de estimación aumenta por ello.

En el caso de usos urbanos suele asumirse que la relación entre el volumen consumido y el volumen retornado es constante, por lo que se puede estimar un coeficiente de retorno que multiplicado por el volumen suministrado daría el volumen retornado.

Para el caso de los usos agrícolas suele ser más complejo el cálculo, debido a la eficiencia de este, depende de varios factores, y que pueden dar lugar tanto a retornos superficiales como a filtraciones. Por lo que para la estimación de los retornos superficiales por riego, se pueden utilizar diversas aproximaciones. La más sencilla y por ello la menos precisa, es considerar un valor constante de porcentaje de retorno con respecto al gasto derivado. Otra forma más aproximada es estimar un porcentaje de retorno para cada mes del año, esto permite considerar la variabilidad de la eficiencia en función del caudal de riego.

Como un apoyo para considerar los retornos a pesar de no disponer de información, se puede proponer unos valores de porcentaje de retorno a utilizar en los planes hidrológicos según el tipo de uso, que se pueden fijar en un 80% para usos urbanos y entre 0% y 20% para usos agrícolas según sea la dotación bruta por hectárea y año(MOPT, 1992)

**6.4.1.- Modelación hidrológica del régimen natural:** En esta parte se realizará la modelación de los distintos escurrimientos que ocurren en la cuenca usando un modelo matemático de lluvia-escurrimiento, empleando la metodología de Témez, introduciendo al software EVALHID los datos obtenidos y obteniendo como resultado gastos, precipitaciones, así como valores de infiltración medios.

**6.4.2.- Modelación subterránea:** Realizar una modelación subterránea tomando en cuenta las distintas extracciones, que se hacen al acuífero, así como la presencia de galerías, conexiones río-acuífero, los datos de infiltración obtenidos en la modelación superficial, utilizando el software AQUIVAL el cual es un método de autovalores que emplea un procedimiento de cálculo de diferencias finitas.

**6.4.3.- Modelación conjunta de la gestión Hídrica:** En esta parte se hace un análisis general tomando en cuenta la modelación superficial y subterránea, elementos de regulación, de transporte realizándose una modelación matemática, utilizando la herramienta SIMGES.

6.4.4.- **Generación de series sintéticas de caudales:** Se realizarán modelos autorregresivos de media móvil con ayuda del software MASHWIM con el cual realizaremos el análisis estocástico de tipo mensual para el estudio de series temporales de aportaciones en un sistema hidráulico.

6.4.5.- **Modelación de la sequía:** Con los parámetros obtenidos en el modelo de gestión hídrica y las series sintéticas obtenidas, se realiza la modelación matemática para determinar situaciones en las cuales el sistema no puede abastecer una demanda, utilizando SIMRISK el cual nos permitirá determinar el riesgo de fallo del sistema que nos generará una sequía operacional.

Adicionalmente a la metodología para el cálculo de sequías operativas se ha aplicado la metodología para la determinación de sequías meteorológicas e hidrológicas.

Se recomienda usar el SPI para un periodo continuo de al menos 30 años. Para su cálculo se selecciona un periodo promedio para determinar una escala de tiempo que generalmente es mensual de 3, 6, 12, 24 o 48 meses. De acuerdo a Zargar (2014) los periodos de agregación específicos para el SPI podrían usarse para caracterizar diferentes fenómenos. Se podrían utilizar periodos de agregación de SPI más cortos (3-6 meses) para obtener estimaciones estacionales de precipitación, ya que representan condiciones de humedad a corto y mediano plazo y tendencias de precipitación a mediano plazo, respectivamente. Sin embargo, el SPI de 12 meses puede reflejar los patrones de precipitación a largo plazo. En este trabajo se usará el SPI de 12 meses ya que se buscan tendencias de sequías a largo plazo, que nos ayudarán a generar programas de prevención en caso de la existencia de estas.

Para la aplicación del SPI se estudiaron un total de 63 estaciones climatológicas en la cuenca de estudio, de las cuales se usaron un total de 29 estaciones climatológicas principales y 34 estaciones climatológicas secundarias

(Figura 6) que funcionaron como auxiliares para el llenado de datos faltantes en las principales, para cada una de las estaciones climatológicas, a partir de la serie histórica de precipitaciones mensuales en el periodo comprendido entre 1980 y 2017.

La serie se ajustó a la distribución de probabilidad Gamma y posteriormente se normalizó. Una vez que el SPI estuvo normalizado, tanto los periodos húmedos como los secos se representaron de la misma manera y aplicando este índice se hizo un seguimiento del sitio en el periodo de estudio (Mckee, 1993). La intensidad de sequía es arbitrariamente definida para valores de SPI con las siguientes categorías (Tabla 5):

**Tabla 5.- Categorías de intensidad de sequía meteorológica**

<b>Valores SPI</b>	<b>Categoría de sequía</b>	<b>Categoría en tiempo</b>
0 to -0.99	Sequías medias	-0.24
-1.00 to -1.49	Sequía moderada	0.092
-1.50 to -1.99	Sequía severa	0.044
$\leq -2.00$	Sequía extrema	0.023
		-0.4

Posteriormente, ya obtenidos los resultados se espacializan, asignando a cada estación climatológica un área de influencia, por medio del método de polígonos de Thiessen.

La sequía hidrológica para este trabajo fue calculada con el Índice de Sequías en Esguerrimiento Superficial asumiendo que las series de volúmenes de esguerrimiento mensuales  $Q_{i,j}$  están disponibles,  $i$  denota el año hidrológico y  $j$  el mes dentro del año hidrológico ( $j=1$  para octubre). Basado en las series obtenidas se tiene:

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j} \quad i = 1,2 \dots j = 1,2, \dots, 12 \quad k = 1,2,3,4$$

Donde  $V_{i,k}$  es el volumen de escurrimiento superficial acumulado para el  $i$ -ésimo año hidrológico y el  $k$ -ésimo periodo de referencia,  $k=1$  para octubre-diciembre,  $k=2$  para octubre-marzo,  $k=3$  para octubre-junio, y  $k=4$  para octubre-septiembre.

Basado en el volumen de escurrimiento superficial acumulado  $V_{i,k}$ . el SDI fue definido por cada periodo de referencia de el  $i$ -ésimo año hidrológico como sigue:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{s_k} \quad i=1,2, \dots, \quad k=1,2,3,4$$

Donde  $\bar{V}_k$  y  $s_k$  son respectivamente la media y la desviación estándar del escurrimiento superficial acumulado de referencia en el periodo  $k$  (Nalbantis, 2008).

La metodología del SDI, se aplicó a cada una de las estaciones hidrológicas presentes en la cuenca, contando con 9 estaciones hidrométricas (18129, 18280, Presa San Juanico, 18181, Presa los Olivos, 18201, 18202, 18452 y 18494)(Figura 3).

Dado que en México existe carencia de datos, primeramente, los datos históricos fueron restituidos a régimen natural, para posteriormente ser extendidas por medio de EVALHID herramienta que se encuentra dentro del Sistema de Soporte a la Decisión AQUATOOL (Andreu, 1996), que es un modelo precipitación-escorrentía, al cual se introducen datos de precipitación, temperatura y evapotranspiración, y se obtienen gastos en un punto de salida, calibrándose con series observadas en la estación hidrométrica y con parámetros de suelo ( $H_{m\acute{a}x}$ ,  $c$  y  $\alpha$ ). Obteniendo resultados que se pueden extender tanto datos climatológicos se tengan.

Para este proyecto se obtuvieron las series de gastos desde octubre de 1980 a septiembre de 2017 para hacerlos coincidir con los del SPI. Finalmente, los

resultados del SDI se comparan con la tabla 2, estableciendo diferentes niveles de sequía para cada valor.

**Tabla 6.- Categorías de intensidad de sequía hidrológica**

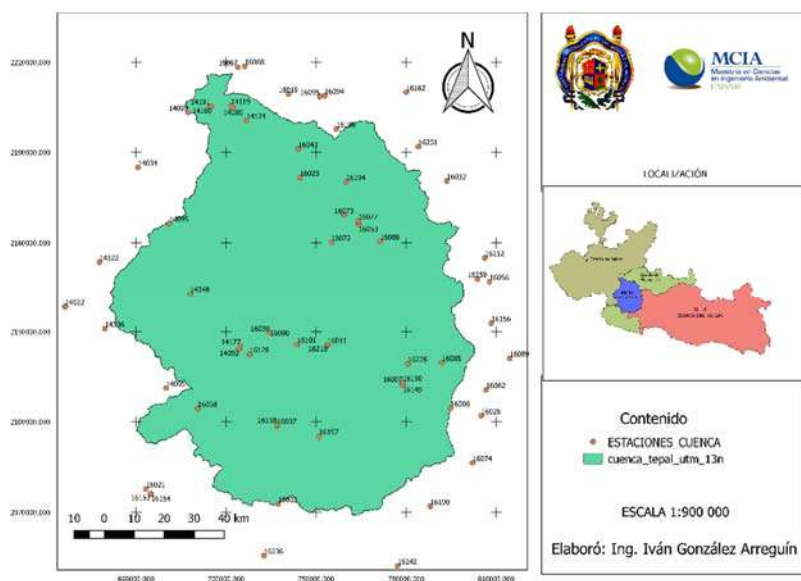
<b>Estado</b>	<b>Descripción</b>	<b>Criterio</b>	<b>Probabilidad (%)</b>
0	No sequía	$SDI \geq 0.0$	50
1	Sequía media	$-1 \leq SDI < 0.0$	34.1
2	Sequía moderada	$-1.5 \leq SDI < -1.0$	9.2
3	Sequía severa	$-2.0 \leq SDI < -1.5$	4.4
4	Sequía extrema	$SDI < -2.0$	2.3

Con los resultados obtenidos se realizó una espacialización, asignando a cada estación hidrométrica el área de influencia correspondiente a su subcuenca de aportación al punto de salida.

## 7 RESULTADOS

### 7.1 Estaciones Climatológicas

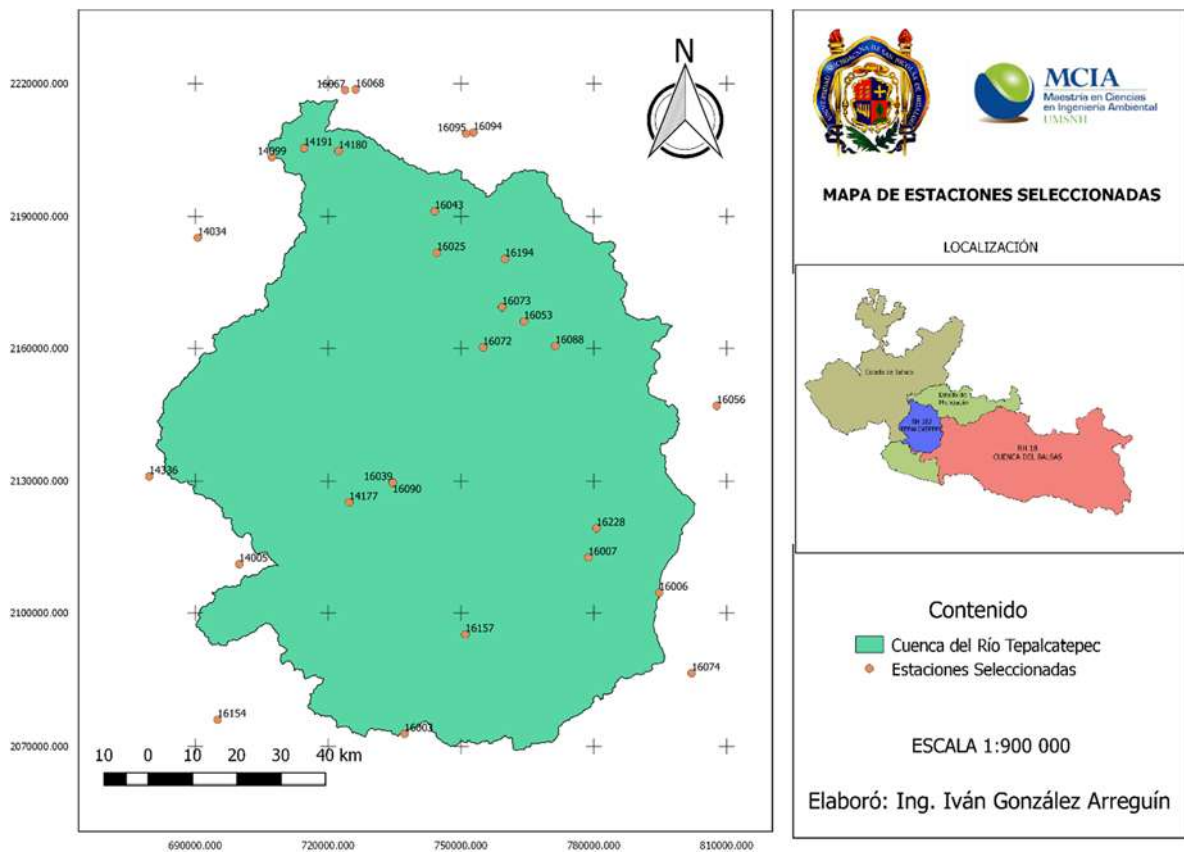
De la Base de datos de CLICOM (CICESE, 2017), se extrajeron las estaciones climatológicas que se considera que tendrían influencia dentro de la cuenca de estudio (Imagen 3), teniendo un total de 63 estaciones, a las cuales se les realizaron una serie de evaluaciones estadísticas (test de Helmert, Secuencias y Límites de Anderson), revisando su consistencia, además de revisar el número de años con datos efectivos de precipitación y temperatura media, finalmente se redujo a un total de 28 estaciones. En la tabla 7 se muestra la tabla con los resultados de los análisis estadísticos y número de años efectivos, con color gris las estaciones climatológicas consideradas como efectivas y con blanco las descartadas o secundarias.



**Figura 6.-** Estaciones climatológicas presentes en la cuenca de estudio

Tabla 7.- Selección de estaciones climatológicas

NOMBRE	CLAVE	COORDENADAS			AÑOS EFECT.	LIM. ANDERSON	helmert	secuencias
		X	Y	Z				
Buenavista I	16011	753772.848	2125700.17	474	11.08	NO	no	no
AHUIJULLO - SUSPENDIDA	14005	699903.038	2111224.33	926	24.54	si	si	si
CLAVELLINAS - OPERANDO	14022	666327.669	2138471.7	850	3.14			
CONTLA - OPERANDO	14034	690585.098	2185177.44	1215	40.59	si	si	si
LOS OLIVOS (CFE) - SUSPENDIDA	14092	724304.38	2124330.99	420	12.57	si	si	si
JUEL M. DIEGUEZ (CFE) - SUSPEN	14095	701044.876	2166501.44	1795	25.04	no	no	no
MAZAMITLA - OPERANDO	14099	707318.642	2203357.64	2229	61.08	si	si	si
QUITUPAN (CFE) - OPERANDO	14119	721546.407	2205499.61	1765	34.60	no	si	si
SAN DIEGO - SUSPENDIDA	14124	726729.119	2200613.21	1657	21.06	no	no	si
LE DE JUAREZ (DGE) - OPERAN	14160	715149.03	2205327.89	1985	36.93	no	si	si
LOS OLIVOS - SUSPENDIDA	14177	724761.278	2125197.81	420	28.76	si	si	si
QUITUPAN - OPERANDO	14180	722341.024	2204771.4	1666	61.43	si	no	si
LE DE JUAREZ (SMN) - SUSPEND	14191	714566.229	2205413.04	1972	27.99	si	si	si
TECALITLAN - SUSPENDIDA	14322	677767.135	2153616.9	1157	9.82	no	si	si
EL GUAYABO - OPERANDO	14336	679594.706	2131033.39	1382	28.98	si	si	si
JILOTLAN - OPERANDO	14348	708020.026	2143022.25	800	25.46	si	no	si
Aguillilla	16003	737235.665	2072818.36	933	34.78	SI	si	si
Antúnez	16006	794770.745	2104558.3	366	51.74	SI	si	si
Apatzingán (SMN)	16007	778755.196	2112740.68	337	90.67	SI	si	si
Cerrito Pelón	16019	740692.535	2209442.93	1982	5.47	SI	si	si
Coalcoman (CFE)	16021	693232.82	2077849.72	1060	16.12	SI	no	no
Cotija	16025	744565.171	2181808.85	2368	55.99	SI	si	si
Cuatro Caminos	16026	805027.99	2102016.37	356	29.42	SI	no	si
Charapan	16032	793536.419	2180703.02	2499	18.08	SI	si	no
El Cajón (CFE)	16037	736907.727	2098651.63	324	14.16	NO	si	si
El Carrizo	16038	710564.915	2104423.29	548	15.51	NO	si	si
Piedras Blancas	16039	734551.546	2129657.78	375	50.54	SI	si	si
El Puerto	16043	744057.912	2191154.02	1694	59.15	SI	si	si
San Sebastián	16053	764202.015	2166059.74	1307	13.68	SI	si	si
Jicalán (CFE)	16056	807755.117	2146995.14	1679	34.22	no	si	si
La Raya	16067	723852.776	2218509.72	2196	47.57	SI	si	si
Las Fuentes	16068	726205.326	2218663.07	2218	45.37	SI	si	si
Los Chorros del Varl	16072	754982.919	2160173.2	975	27.61	NO	si	si
Los Limones (CFE)	16073	759285.276	2169279.96	1254	42.43	SI	si	si
Los Panches (CFE)	16074	802088.575	2086519.67	197	34.74	SI	si	si
Los Reyes	16077	764008.5	2167318.34	1310	36.76	SI	si	si
Nueva Italia (CFE)	16082	806641.637	2110629.39	486	33.72	NO	si	si
Coalcoman (SMN)	16085	756095.538	2186381.05	1203	32.28	SI	no	si
Parácuaro	16085	791895.92	2119744.86	611	31.78	si	si	no
Periban	16088	771284.805	2160534.8	1647	26.26	SI	no	no
Planta El Cóbano (CFE)	16089	814450.515	2121163.82	572	28.43	si	no	no
Piedras Blancas (CFE)	16090	734581.151	2129627.4	363	34.25	SI	si	si
Presa Guaracha	16094	752800.447	2208936.31	1635	55.50	SI	si	si
Presa Jaripo	16095	751175.26	2208666.86	1586	51.40	SI	si	si
Punta de Agua	16101	743572.128	2125807.64	385	52.01	SI	no	no
San Ángel	16106	756714.69	2197855.5	1830	36.45	SI	si	no
Tepalcatepec	16128	727833.393	2122529.07	368	32.45	NO	si	no
URUAPAN	16138	804590.011	2147649.48	1578	1.00	SI	si	no
Apatzingán (DGE)	16149	778851.778	2112157.54	333	14.96	SI	no	no
Apatzingán (CFE)	16150	778837.81	2113080.39	331	5.56	SI	si	no
Coalcoman (DGE)	16153	694713.068	2076327.49	1025	22.69	si	no	no
Coalcoman (SMN)	16154	695009.146	2076023.06	1089	54.02	SI	si	si
Charapendo	16156	808343.975	2132939.99	1025	19.19	NO	no	si
Chila	16157	751002.841	2095145.53	293	15.84	SI	si	si
El Cajón (CFE)	16158	736901.835	2099112.94	324	41.57	NO	si	si
Orandino	16162	779956.36	2210025.4	1605	45.22	si	si	no
Uruapan	16164	804590.011	2147649.48	1634	63.65	NO	si	si
Arceo	16190	788013.717	2072050.79	327	9.54	si	si	no
Arceo, Mich.	16190	788009	2072053	308	9.00	SI	no	no
Tocumbo, Mich.	16194	759936.26	2180402	1605	25.65	SI	si	si
Barranca de Cupatitzio	16212	806216.535	2155063.41	2021	13.80	no	no	si
Buenavista II	16216	753771.995	2125761.68	470	10.49	NO	si	no
Acahuato	16228	780585.413	2119322.35	948	96.26	SI	si	si
El Jovero	16236	732554.537	2055535.81	884	4.01	no	no	no
Tumbiscatío	16242	777105.561	2052196.21	913	4.34	no	no	no
Patamban	16251	784030.636	2191903.94	2165	10.08	no	no	no
Tzindío	16259	803650.101	2147972.23	1838	2.57	no	no	no



**Figura 7.-** Mapa de estaciones principales, después de aplicados los distintos criterios.

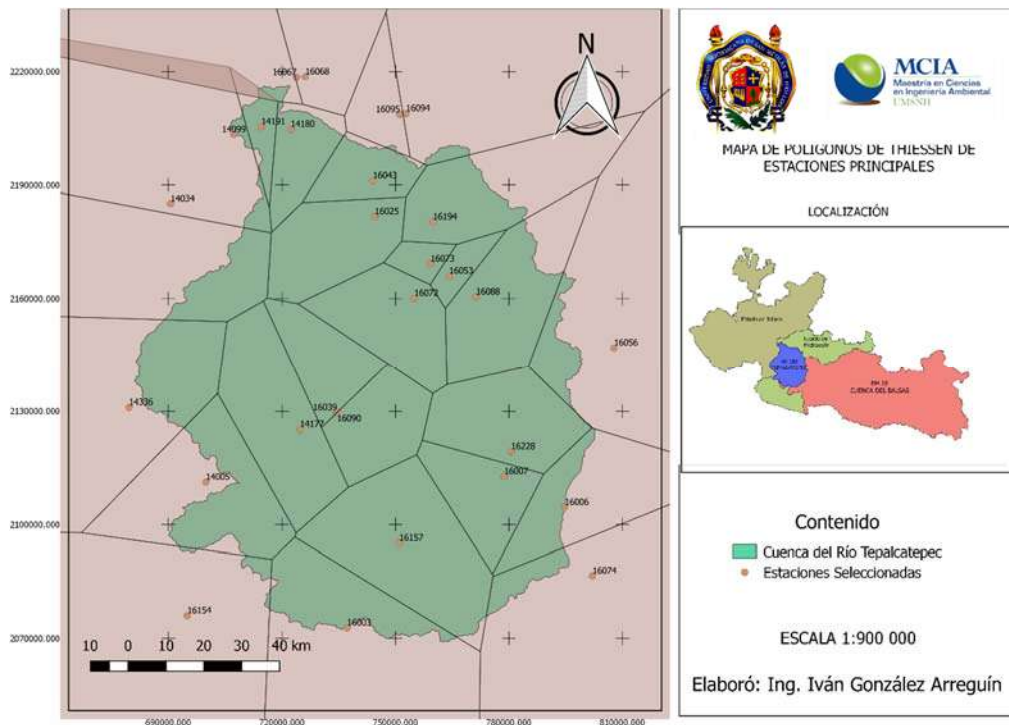
Posteriormente a la selección de estaciones climatológicas principales, se procede a realizar el llenado de datos faltantes. Se realiza una matriz de correlación en la cual se cruzan cada una de las estaciones climatológicas con todas las demás, se crea una nueva matriz, donde si la correlación entre dos series de precipitación es al menos 0.6, se tiene un valor de 1, si es menor, es cero. Posteriormente, de igual manera se realiza una matriz del más menos 10 por ciento de la precipitación media anual, comparando cada una de las estaciones climatológicas con todas las demás, teniendo uno, si la precipitación media anual es más menos diez por ciento, y cero si es diferente.

Finalmente se cruzan ambas matrices y todas las que coincidan, serán aptas para completar los datos faltantes de cada una de las estaciones, por medio de la

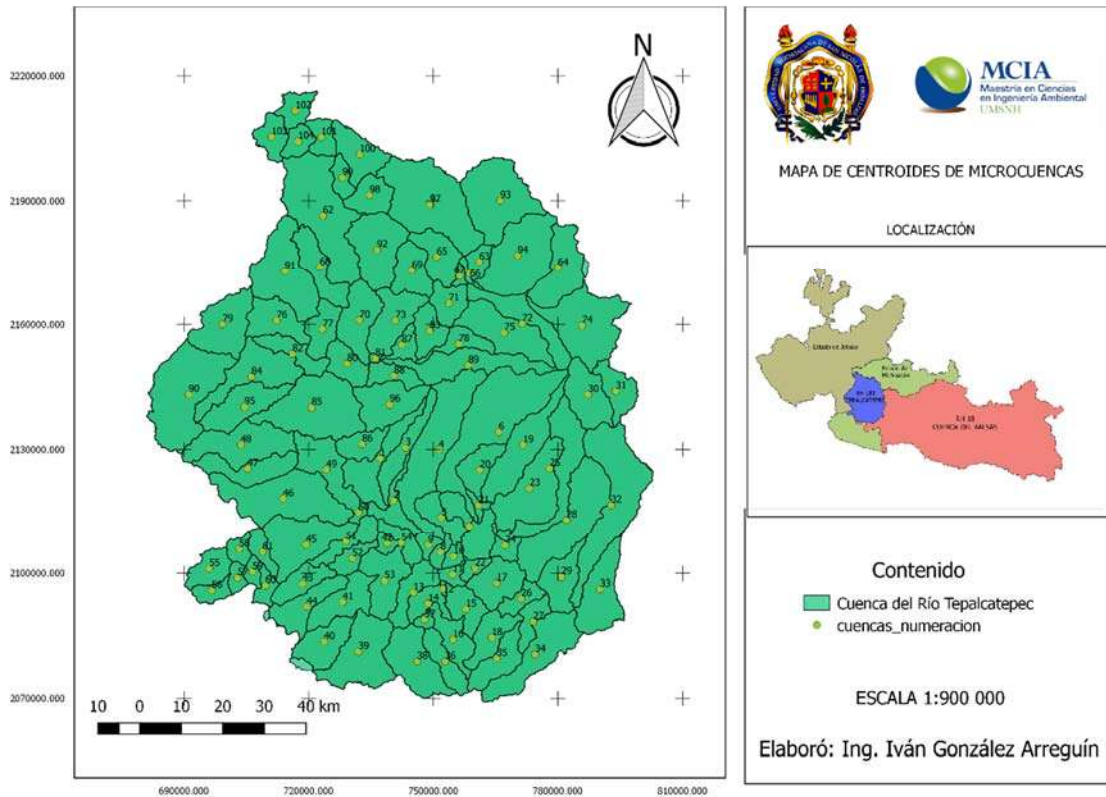
U.S. National Weather Service. Teniendo al menos 3 estaciones cada una y máximo 7.

Las series de temperatura por su cuenta se integran con las medias de cada mes de los datos con que se cuenta para cada estación climatológica.

Una vez que se cuenta con los datos de todas las estaciones climatológicas, sin vacíos, se procede a pasar la información de precipitación y temperatura a los centroides de cada una de las microcuencas creadas dentro de la cuenca, por medio de la fórmula del inverso de la distancia al cuadrado, para realizar la modelación semi-agregada. La información de evapotranspiración se calcula aplicando el método de Thorntwaite (Wilm y otros, 1943), que es un método práctico para el cálculo de la evapotranspiración que se ha utilizado desde mediados del siglo XX hasta nuestros días para el estudio de sequías (Spinoni y otros, 2015), de efectos del cambio climático, abastecimiento de agua y problemas ambientales, (Jeevananda Reddy, 1995), (Di Matteo y otros, 2017).



**Figura 8.-** Zona de influencia de estaciones climatológicas mediante polígonos de Thiessen.



**Figura 9.- Centroides de microcuencas**

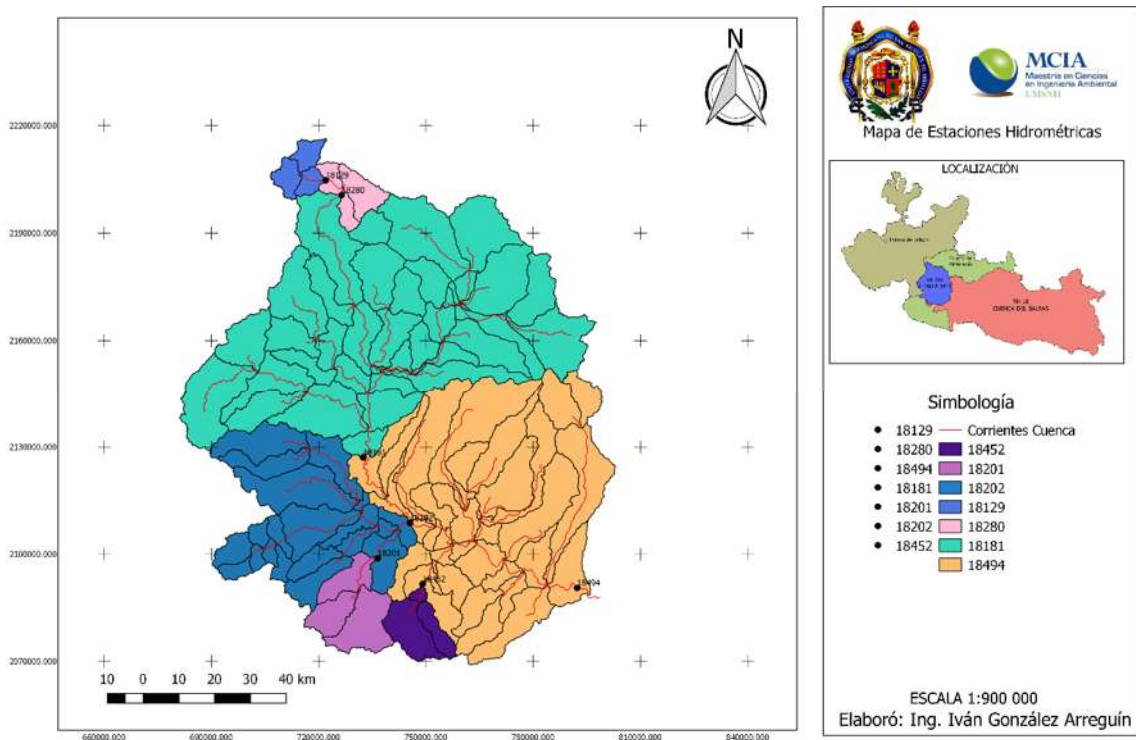
### 7.1. Modelación superficial

La modelación superficial se realizó tres veces, la primera por medio del modelo de Témez, obteniendo resultados satisfactorios pero mejorables, por lo que se realizó una segunda modelación ahora con el modelo de HBV considerando que al ser un modelo que maneja un mayor número de parámetros se podría acercarse de mejor manera a la realidad, obteniéndose un mejor conocimiento del modelo y una ligera mejora, sin llegar aún a resultados totalmente satisfactorios ya que se considera que por contar con poca información para la cuenca no era posible reproducir completamente los datos reales, finalmente se realizó una tercera modelación con el modelo de Témez una vez más, obteniendo excelentes resultados.

En la primera y segunda modelación la cuenca del Río Tepalcatepec se subdividió en 7 subcuencas, teniendo como puntos de salida subcuenca, una estación hidrométrica, la cual funciona para comparar los escurrimientos obtenidos del modelo precipitación-escorrentía con los escurrimientos medidos en estas

estaciones hidrométricas. Las subcuencas de modelación a su vez estas fueron subdivididas en 104 microcuencas, delimitadas hidrográficamente.

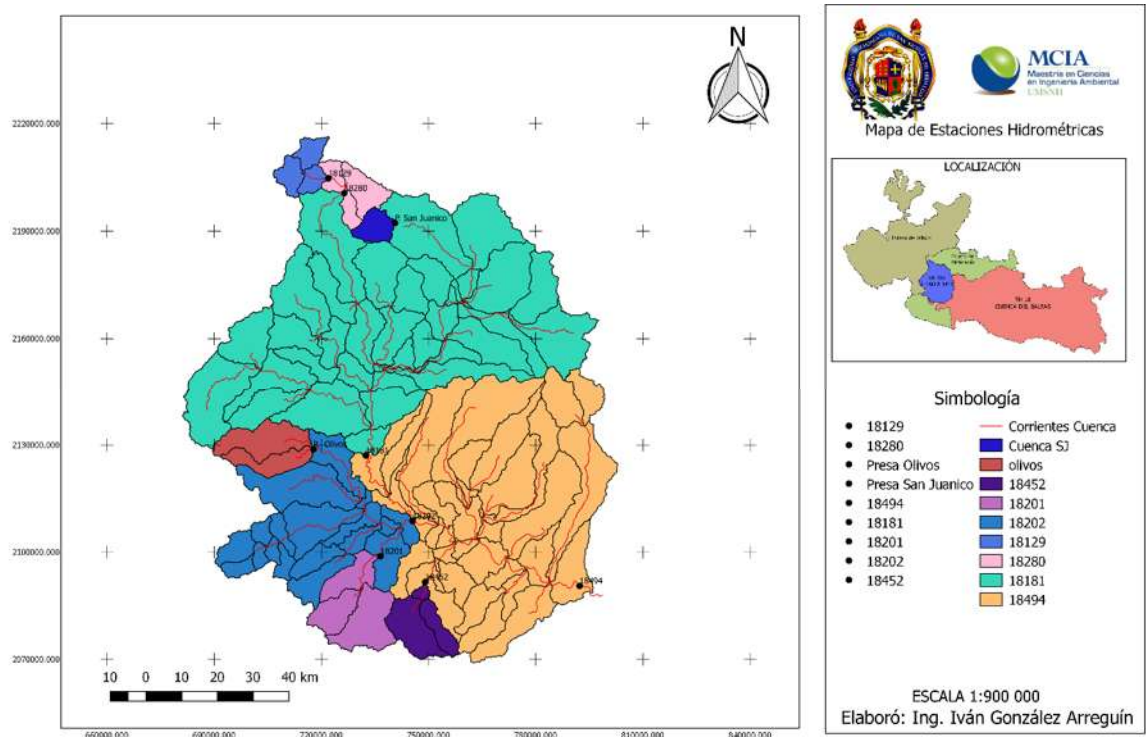
En la Figura 9 se observan las microcuencas de simulación delimitadas con línea negra, y de diferentes colores cada una de las subcuencas que en el punto de salida tienen una estación hidrométrica.



**Figura 10.-** Mapa de estaciones hidrométricas en cuenca del Río Tepalcatepec, para su acople en EVALHID.

En la tercer modelación, se agregaron dos subcuencas de modelación más, fragmentando la subcuenca 18181 y 18202 en una más a cada caso, debido a que ya se tenía información hidrométrica tanto de la presa San Juanico y la Presa Los Olivos que ayudaría para calibrar lo que generaría el modelo precipitación-escorrentía. La información hidrométrica de las nuevas dos subcuencas se obtuvo con el balance de masa realizado considerando las variaciones de volúmenes dentro de la presa y sus salidas, obteniendo de esta manera una restitución ante la presencia de las presas para cada caso. En la figura 13 se observa el mapa de las

estaciones hidrométricas que se utilizaron para la tercera modelación ya incluyendo las 2 nuevas estaciones de aforo.



**Figura 11.- Estaciones hidrométricas para tercer modelación**

Se crean los archivos necesarios para iniciar el modelado mediante el software EVALHID. Cuando ya se tiene calculado en el software EVALHID, se pasa al proceso de calibración con el mecanismo de optimización SCE-UA (Duan y otros, 1992) para Visual Basic en Excel adaptado para sistemas de recursos hídricos por Lerma (Lerma y otros, 2015).

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la calibración del modelo lluvia escurrimiento para cada una de las subcuencas, comparando además cada una de las modelaciones para cada subcuenca.

## Subcuenca 18129

Se encuentra en la parte norte de la cuenca, abarca los municipios de Mazamitla, Valle de Juárez, Quitupan y Marcos Castellanos del Estado de Jalisco, esta subcuenca cuenta con un área de 158.714 km<sup>2</sup>, en toda su superficie se sitúa sobre el acuífero Valle de Juárez.

Litológicamente en su mayoría está constituida por rocas ígneas extrusivas como el basalto y la brecha volcánica básica; con depósitos de material aluvial. La cobertura vegetal está formada por bosque, que favorece al impedimento de la erosión y desgaste del suelo, también se puede observar cobertura tipo selva la cual se caracteriza por una vegetación arbustiva con altura comúnmente inferior a 4 m. Se desarrolla principalmente sobre terrenos aluviales más o menos bien drenados, la vegetación es baja y cubre una porción relativamente pequeña del suelo, por lo que éste está expuesto al sol, con insolación fuerte e intensa. El área restante está constituida por área agrícola y pastizales (CONAGUA, 2014).

En la tabla 8 se observan los resultados de cada una de las modelaciones realizadas con sus respectivos indicadores de ajuste.

**Tabla 8.- Resultados de parámetros de modelaciones e indicadores de ajuste subcuenca 18129**

Estacion	Área (km2)	No. Modelac.	Modelo	Parámetros								Indicadores de ajuste					
				Témez	Hmáx		c		Imáx		α		NS	ln NS	r	SS	Promedio
				HBV	Beta	Fc	PWP	Lmax	k0	k1	k2	kperc					
18129	158.72	1	Témez		395.63		0.54		219.45		0.45		0.313	0.219	0.5591	0.9968	0.522
		2	HBV	2.49	732.9	436	34.2	0.637	0.187	0.004	0.176	0.515	0.488	0.719	0.99	0.678	
		3	Témez		336.085		0.466		11.2846		0.9		0.644	0.643	0.807	0.998	0.773

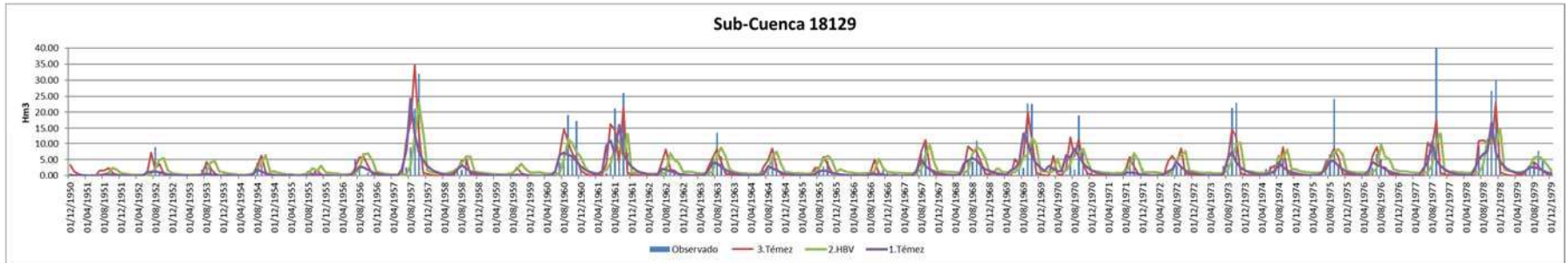


Figura 12.- Esgurrimento mensual de la sub-cuenca 18129

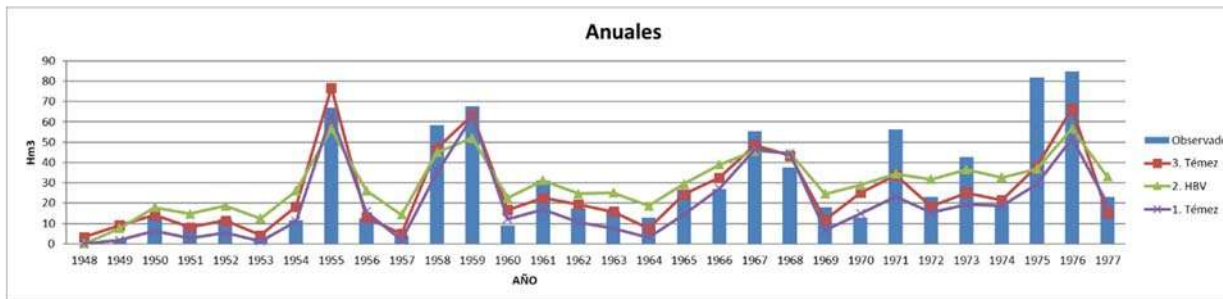


Figura 13.- Esgurrimento anual de la sub-cuenca 18129

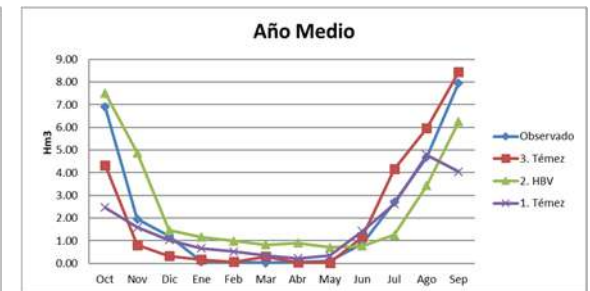


Figura 14.- Año medio

Se consideraron 29 años para efectuar la modelación, (1948-1977), se observa que todas estas muestran la tendencia de los observados, pero la tercera modelación correspondiente al modelo de Témez se apega más a los observados principalmente en las épocas de estiaje y en los picos altos, para el caso de las series de escurrimiento anual, de igual manera las tres modelaciones conservan la tendencia de los observados. En algunos picos la modelación en HBV es la que mejor se apega a los datos observados, sin embargo, para otros años sobre estima el escurrimiento. Para el gasto del año medio se observa que HBV sobreestima el gasto en los meses de estiaje, el método de Témez en los dos casos se apega a los observados, pero en los meses húmedos la modelación 1 diverge, teniendo como resultado que la mejor modelación es la número 3 considerando el modelo de Témez con un promedio de los parámetros de ajuste de 0.77.

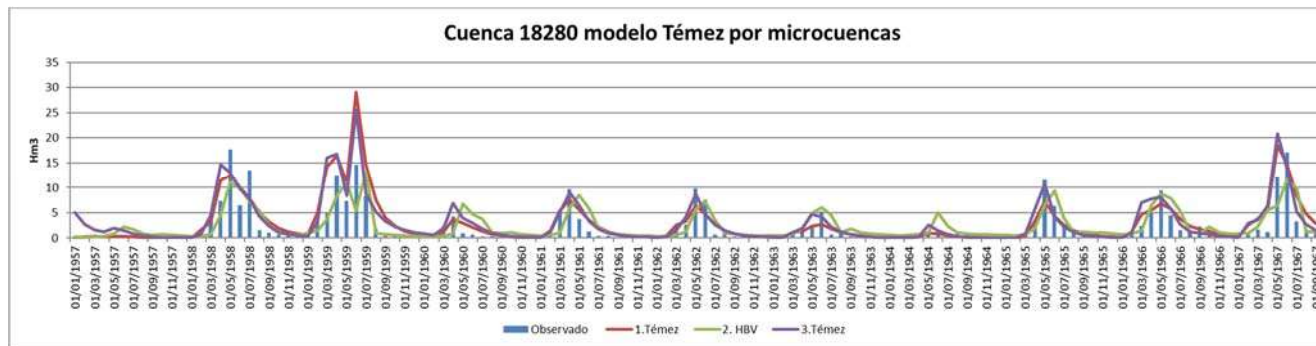
#### Subcuenca 18280.

Se encuentra en el norte de la cuenca, abarca principalmente el municipio de Quitupan en el estado de Jalisco y una pequeña parte del municipio de Cotija en el estado de Michoacán, abarca una superficie de 194.02 km<sup>2</sup>.

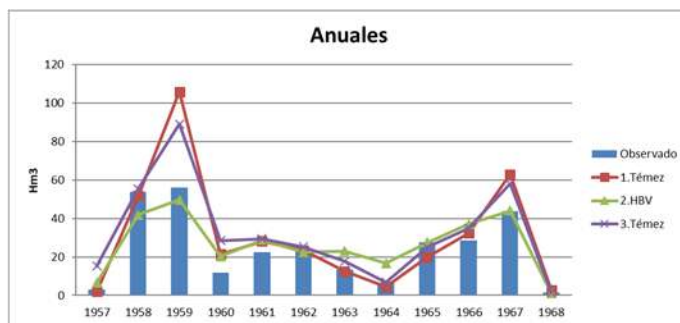
Cuenta con una temperatura templada sub-húmeda, litológicamente la zona de estudio está conformada principalmente por rocas ígneas extrusivas (basalto, toba intermedia, brecha volcánica básica y riolita-brecha volcánica ácida). Al centro y norte de acuífero se pueden observar depósitos aluviales y lacustres. Una considerable porción de la superficie del acuífero está cubierta por bosque que es una comunidad vegetal que impide la erosión y el desgaste del suelo, ya que la bóveda de hojas intercepta y redistribuye la precipitación, esa distribución más lenta y poco uniforme de la lluvia asegura que el suelo y el agua no sean arrastrados de forma inmediata; lo cual puede aumentar la capacidad de la tierra para capturar y almacenar reservas de agua (CONAGUA, 2011b). Lo cual nos permitiría tener valores altos de Humedad máxima e Infiltración. Para su modelación se debe anidar la subcuenca 18129.

**Tabla 9 .-Resultados parámetros e indicadores de ajuste subcuenca 18280.**

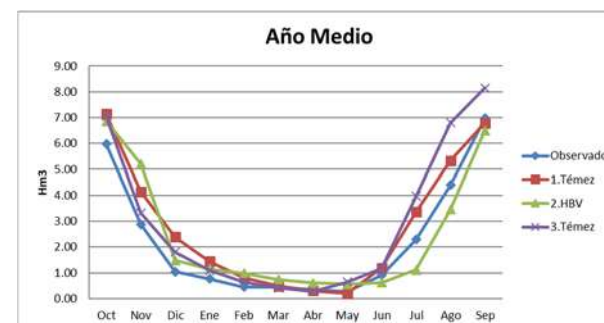
Estacion	Área (km2)	No. Modelac.	Modelo	Parámetros								Indicadores de ajuste					
				Témez	Hmáx		c		Imáx		α		NS	ln NS	r	SS	Promedio
				HBV	Beta	Fc	PWP	Lmax	k0	k1	k2	kperc					
18280	194.02	1	Témez		602.69		0.2		465.98		0.9		0.313	0.219	0.5591	0.9968	0.522
		2	HBV	5	981.8	8	53.8	0.056	0.01	5E-08	0.726	0.439	0.584	0.667	0.989	0.6698	
		3	Témez		792.734		0.15		1243.077		0.3		0.678	0.639	0.851	0.987	0.7888



**Figura 15.- Esguerriminto mensual subcuenca 18280**



**Figura 16.- Esguerriminto anual de la sub-cuenca 18280**



**Figura 17.- Año Medio**

En las series de escurrimiento mensual, el mejor comportamiento gráfico tanto para época de estiaje como para época húmeda es el correspondiente a la modelación 2 realizada con HBV, pero el error en este modelo viene en las épocas húmedas de los años con escurrimientos bajos (1960 y 1964), ya que estima escurrimientos mayores, aquí es donde toma ventaja la modelación 1 y 3 del modelo de Témez, que tiene un buen comportamiento en general, a excepción del año 1959. En los parámetros de ajuste los modelos de Témez tienen bastante ventaja, y aún más la modelación 3, la desventaja de la modelación 3 podría ser los valores de  $H_{m\acute{a}x}$  e  $I_{m\acute{a}x}$  son relativamente altos, pero esto queda satisfecho al observar que la cuenca cuenta con bosque con comunidad vegetal abundante y su bóveda de hojas que favorece esa humedad e infiltración alta.

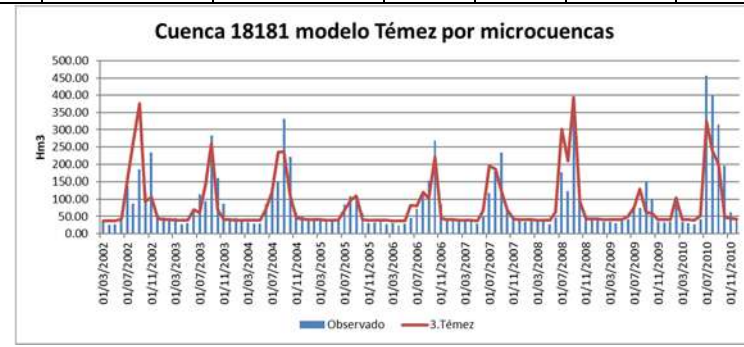
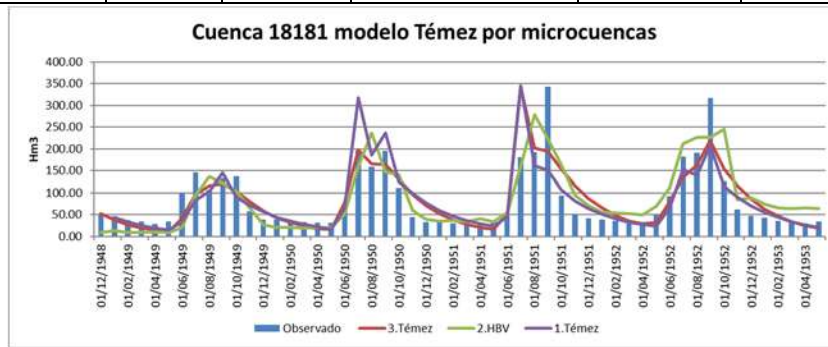
#### Subcuenca 18181.

La subcuenca con mayor cobertura del sistema, abarca la mitad del área de estudio con 5417.79 km<sup>2</sup> para la primera y segunda modelación, para la tercera modelación sufre una pequeña subdivisión de una microcuenca de 79.14 km<sup>2</sup>. Abarca los municipios de Valle de Juárez, Tamazula de Gordiano, Quitupan, Santa María del Oro, Jilotlán de los Dolores en el estado de Jalisco y Los Reyes, Tocumbo, Tingüindín, Cotija y Tangamandapio del estado de Michoacán. Se sitúa sobre los acuíferos de Colomos y Cotija.

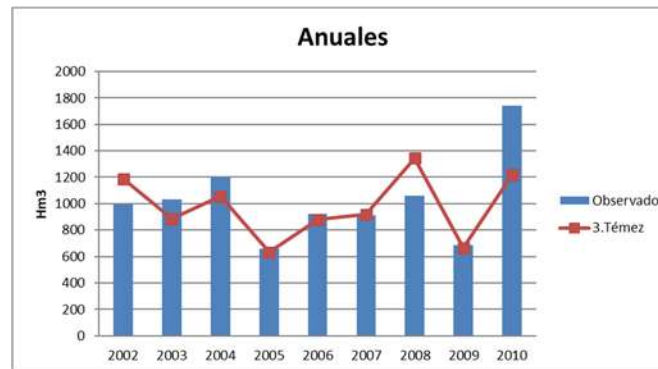
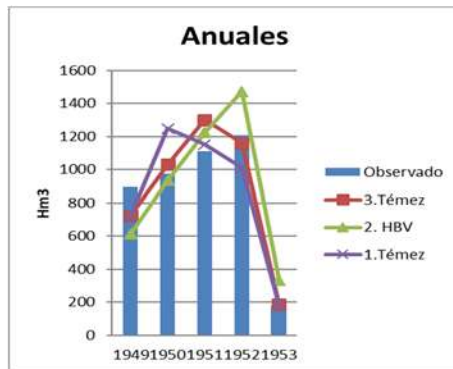
Principalmente la geología está compuesta por, rocas ígneas intrusivas, algunos afloramientos de rocas ígneas extrusivas, afloramientos de rocas sedimentarias de diversos orígenes y presencia de material piroclástico. La vegetación está compuesta por arbóreas, cerros con suelos de buen drenaje que ayudan a la regulación hidrológica, control de la erosión y el mantenimiento de la humedad de los suelos. En la mayoría de los casos, la capacidad de infiltración supera la intensidad de las lluvias, lo que significa que la mayor parte del agua que llega al suelo bajo cobertura forestal infiltra. El área restante está constituida por área agrícola y pastizales (CONAGUA, 2009); (CONAGUA, 2011a).

**Tabla 10.- Resultados, parámetros e indicadores de ajuste subcuenca 18181**

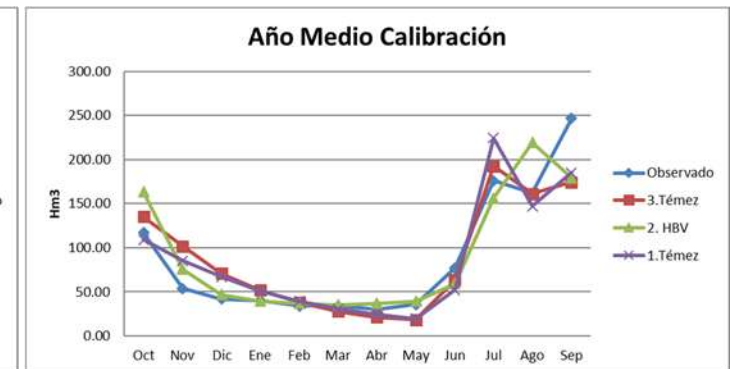
Estación	Área (km <sup>2</sup> )	No. Modelac.	Modelo	Parámetros								Indicadores de ajuste					
				Témez	Hmáx		c		Imáx		α		NS	ln NS	r	SS	Promedio
				HBV	Beta	Fc	PWP	Lmax	k0	k1	k2	kperc					
18181	5417.79	1	Témez		602.69		0.2		465.98		0.9		0.313	0.219	0.5591	0.9968	0.522
		2	HBV	0.201	2247	173.1	49.6	0.135	0.135	0.008	0.68	0.672	0.321	0.836	0.998	0.7068	
		3	Témez		792.734		0.15		1243.077		0.3		0.678	0.639	0.851	0.987	0.7888



**Figura 18 y Figura 19.- Escurrecimiento mensual subcuenca 18181**



**Figura 20 y Figura 21.- Escurrecimiento anual para subcuenca 18181**



**Figura 22.- Año medio**

Para la subcuenca 18181, de la misma manera se hicieron tres modelaciones, en las cuales se anidaron la subcuenca 18129 y 18280, la primera y la tercera con el método de Témez y la segunda con el método de HBV, en la primera y segunda modelación solo se contaban con 4 años para realizarla y se obtuvieron resultados regulares siendo en el HBV donde se logró acercarse más a los picos de los meses húmedos y a los escurrimientos base de las épocas de estiaje.

Se realizó una tercera modelación, modelando del 1949 a 1953 y validando del 2002 al 2010, los datos de escurrimiento del 2002 al 2010 se obtuvieron a partir de un balance de masas calculado con las salidas de la presa y la variación del almacenamiento (Figura 19 y 21), obteniendo los mejores resultados y con un promedio de los parámetros de ajuste de 0.788.

#### Subcuenca Presa San Juanico

Esta sub-cuenca de simulación fue adaptada al modelo hasta la tercera modelación donde se observó que se debía tener un modelo más exacto de lo que ocurría en la cuenca, para en obtener una mejor calibración de la presa San Juanico en el modelo de gestión hídrica.

Es la subcuenca más pequeña de todas, consta de una superficie de 79.14 km<sup>2</sup> y se encuentra entre el municipio de Quitupan del estado de Jalisco y Cotija del estado de Michoacán.

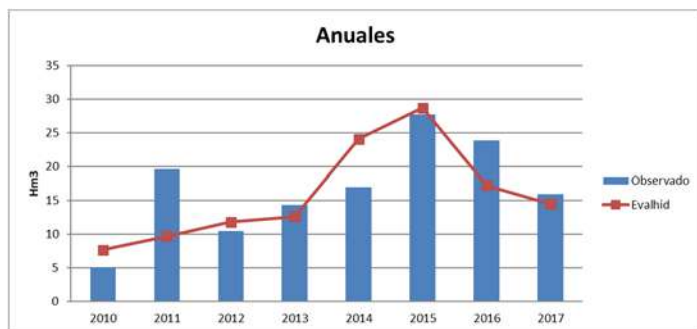
La mayor parte de la cuenca tiene bosques de pino y encino y con otra pequeña porción de manejo agrícola, los suelos son luvisoles casi en su totalidad con una parte de andosoles, la litología está compuesta en su mayoría de basalto.

**Tabla 11.- Resultados parámetros e indicadores de ajuste subcuenca de presa San Juanico**

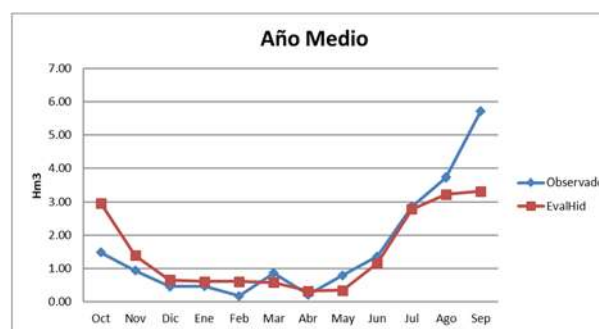
Estacion	Área (km2)	No. Modelac.	Modelo	Parámetros				Indicadores de ajuste				
				Hmáx	c	Imáx	$\alpha$	NS	In NS	r	SS	Promedio
P. San Juanico	79.14	1	Témez	274.279	0.1	742.797	1	0.379	0.2424	0.623	0.996	0.5601



**Figura 23.- Escurrimiento mensual subcuenca Presa San Juanico**



**Figura 24.- Escurrimiento anual**



**Figura 25.- Año medio**

Para esta modelación se obtuvo una calibración buena ya que se obtuvo un promedio de 0.56, con el parámetro de Nash Sutcliffe y Nash Sutcliffe modificado apenas satisfactorios (mayores de 0.2), en los gráficos se observan ligeras variaciones atribuyéndole principalmente a errores en las mediciones en la presa y a que en los meses secos al restar la diferencia de volúmenes a las salidas resultan valores negativos, lo cual no tiene un valor físico real y se sustituyó con ceros, otra de las variaciones se perciben principalmente en los meses de septiembre en los años de 2013, 2014 y 2016, en los cuales los observados son del orden de 9 hm<sup>3</sup> y el modelo no logra reproducir tal gasto quedándose entre 5 y 6, atribuyéndole esto de igual manera a que las mediciones en la presa no fueron correctas o a que las tomas de datos no fueron diarias, manteniendo una lectura alta una mayor cantidad de días de los que estuvo realmente.

#### Subcuenca Presa Los Olivos.-

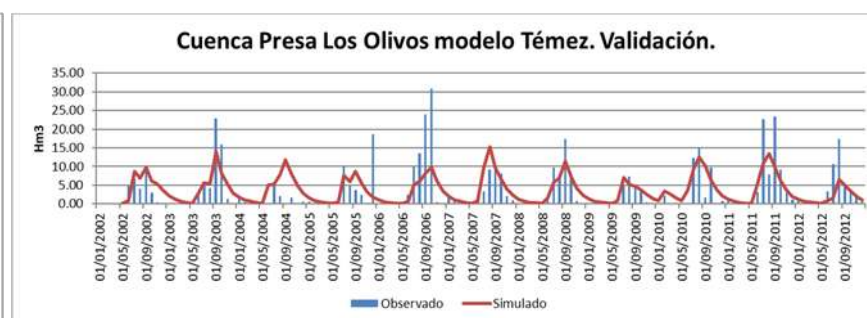
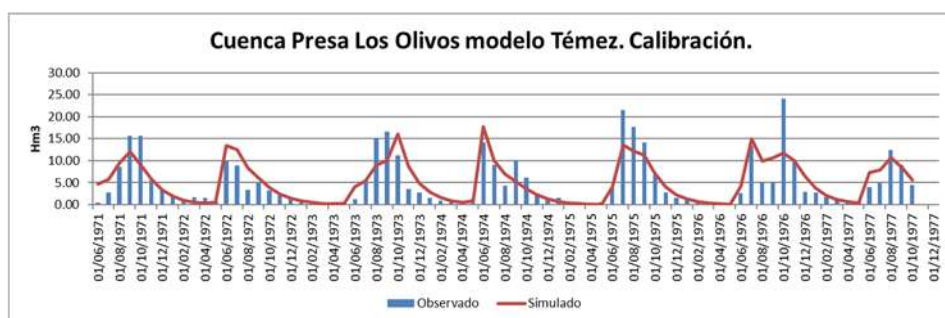
Esta sub-cuenca de simulación fue adaptada al modelo hasta la tercera modelación, donde se observó que se debía tener un modelo más exacto de lo que ocurría en la cuenca, ya, además de que se pudo realizar un balance de masas de los escurrimientos en la presa a partir de los datos registrados de salidas y variaciones del almacenamiento del 2010 al 2017.

Esta subcuenca es pequeña, tiene un área de drenado de 303.57 km<sup>2</sup>, tiene presencia en los municipios de Tecalitlán y Jilotlán de los Dolores en el Estado de Jalisco y se sitúa sobre el acuífero Colomos.

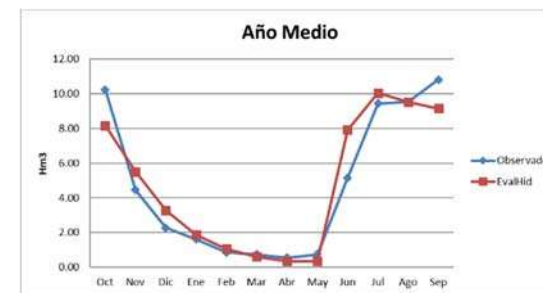
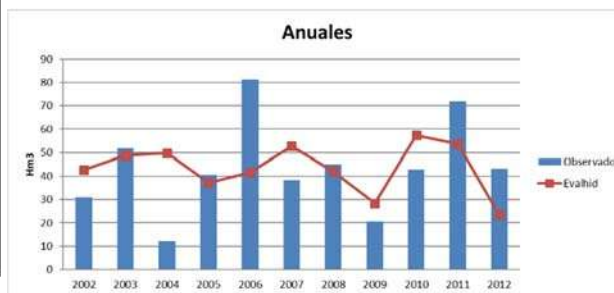
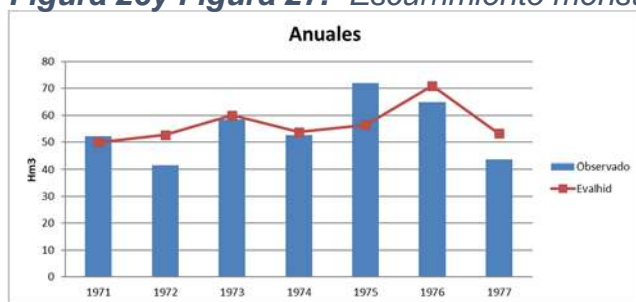
Litológicamente está compuesta principalmente por roca ígnea intrusiva del cretácico (granito-granodiorita) y una pequeña parte por tobas intermedias del terciario superior una pequeña parte, la cubierta vegetal se compone en la zona oeste de bosque de pino y la zona este de selva baja caducifolia, marcando el cambio entre un clima templado y cálido subhúmedo.

**Tabla 12.- Resultados parámetros e indicadores de ajuste subcuenca de presa Los Olivos.**

Estacion	Área (km2)	No. Modelac.	Modelo	Parámetros				Indicadores de ajuste				
				Hmáx	c	Imáx	$\alpha$	NS	In NS	r	SS	Promedio
P. Los Olivos	79.14	1	Témez	234.738	0.1	181.688	0.563	0.71	0.626	0.842	0.999	0.7943
		validación						0.471	0.432	0.842	0.999	0.686



**Figura 26y Figura 27.- Escurrimiento mensual subcuenca Presa Los Olivos calibración y validación**



**Figura 28, Figura 29 y Figura 30.- Escurrimiento mensual subcuenca Presa Los Olivos , calibración, validación y del año medio.**

Esta modelación se realizó con el modelo de Témez, calibrando en la etapa de 1971 a 1977, obteniendo un promedio de parámetros de ajuste de 0.79 siendo muy buena, teniendo una buena validación con los datos hidrométricos del 2002 al 2010 con un promedio de 0.686, siendo buena. Los anuales tienen un buen comportamiento gráfico en la modelación y en la validación se observa regular, teniendo el principal error en el año 2004 que está muy por arriba de los observados y en el 2006 que está muy por debajo, pese a eso, la modelación cumple.

#### Subcuenca 18201

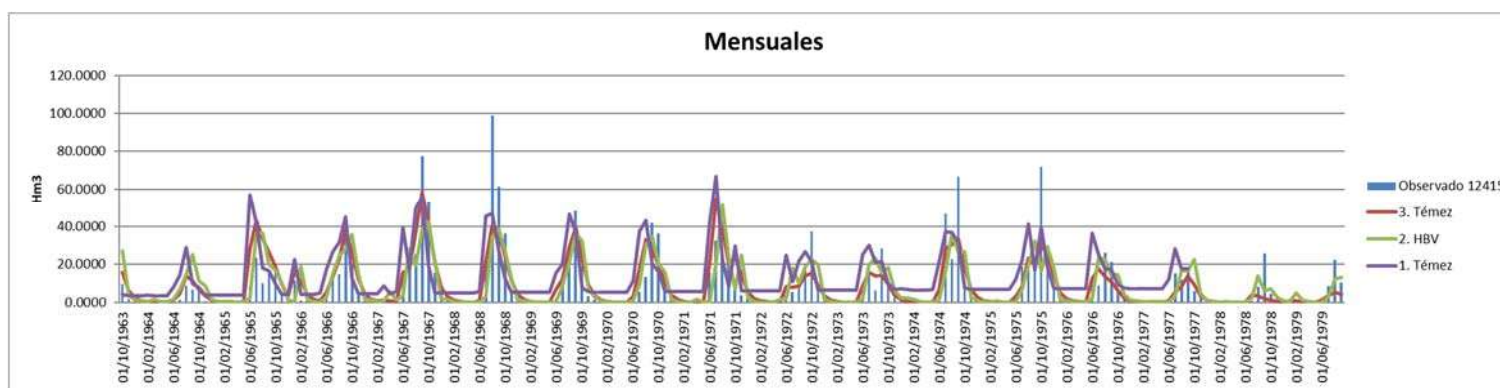
Subcuenca de modelación con una superficie de 427.19 km<sup>2</sup>, está principalmente dentro del municipio de Aguililla, y una pequeña parte en los municipios de Tepalcatepec y Coalcomán, los tres en el estado de Michoacán.

Litológicamente está compuesto en la parte oeste por una roca sedimentaria del cenozoico (arenisca-conglomerado) y la parte este está conformado por una roca sedimentaria y roca ígnea intrusiva (dorita) del terciario, la cobertura vegetal en su mayoría está formada por selva baja caducifolia de baja cobertura y una pequeña parte de bosque de pino y encino.

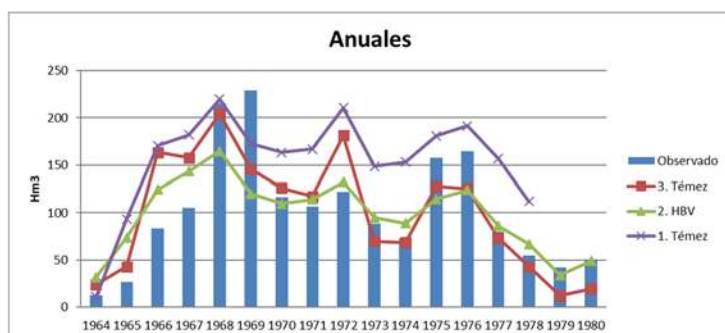
Se puede observar gráficamente (Figuras 31, 32 y 33) que los mejores ajustes tanto como para el escurrimiento mensual, anual y el año medio se tienen para el modelo realizado en HBV y la tercera modelación correspondiente a Témez, pero numéricamente se observa mejor la modelación de Témez. La primera modelación de Témez queda totalmente descartada ya que pese a ser buena en promedio de parámetros de ajuste, los gráficos se observan incorrectos, teniendo en los últimos años un escurrimiento base sobreestimado que no debe ser permitido.

**Tabla 13.- Resultados parámetros e indicadores de ajuste subcuena 18201**

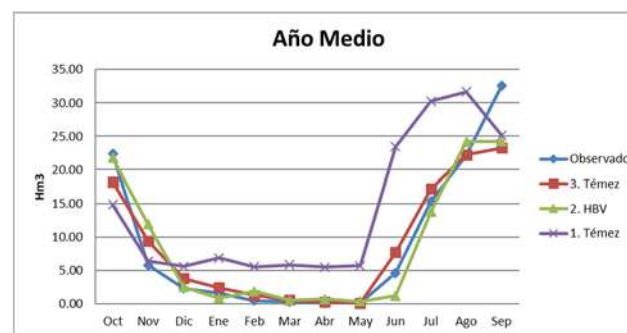
Estacion	Área (km <sup>2</sup> )	No. Modelac.	Modelo	Parámetros								Indicadores de ajuste					
				Témez	Hmáx		c		Imáx		α		NS	ln NS	r	SS	Promedio
				HBV	Beta	Fc	PWP	Lmax	k0	k1	k2	kperc					
18201	427.189	1	Témez		300		0.73		620		0.0012		0.418	0.231	0.684	0.882	0.5538
		2	HBV	0.1	665.6	211	60	0.198	0.155	1E-05	0.584	0.558	0.806	0.747	0.999	0.7775	
		3	Témez		367.823		0.141		329.136		0.9		0.669	0.9	0.82	0.999	0.847



**Figura 31.- Esguerrimiento mensual subcuena 18201.**



**Figura 32.- Esguerrimientos anuales subcuena 18201**



**Figura 33.- Año medio**

## Subcuenca 18202

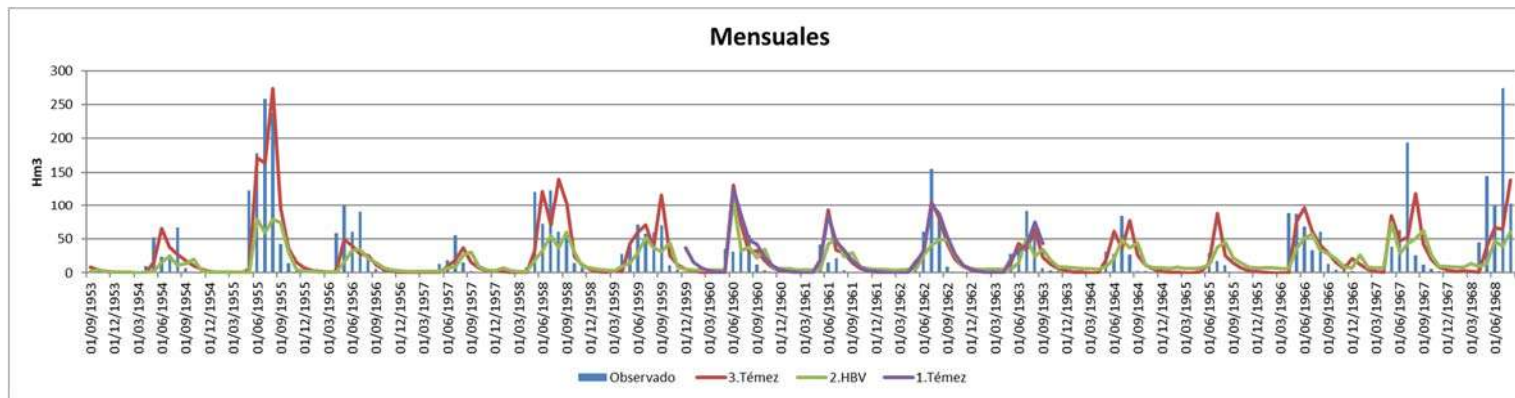
Cubre una superficie de 1682 km<sup>2</sup>, tendiendo anidada en su interior la subcuenca de la presa Los Olivos y la subcuenca 18201. Se encuentra dentro de los municipios de Aguililla, Tepalcatepec y Coalcomán del Estado de Michoacán, Jilotlán de los Dolores y Tecalitlán del estado de Jalisco.

Litológicamente está compuesto por roca sedimentaria, principalmente lutita y arenisca y algunas proporciones de roca sedimentaria, teniendo en la parte oeste presencia de material aluvial, empezando a tener pendientes bajas aptas para el manejo agrícola, ya que se empieza a ser cuenca baja. La vegetación está formada en su mayoría por selva baja caducifolia y una pequeña parte en la parte oeste de bosque de pino y encino en la parte alta de la montaña.

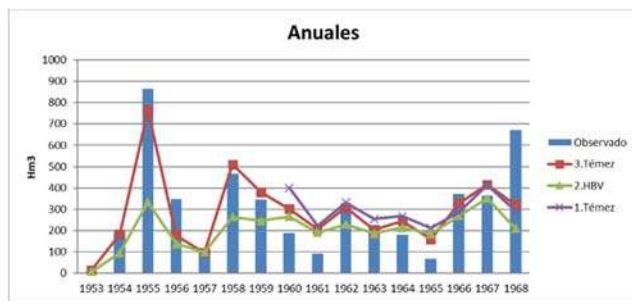
Se puede observar en las figuras 34, 35 y 36 que pese a los tres gráficos tienen una buena tendencia, sin duda el que mejor se ajusta a las épocas de estiaje y húmedas es el modelo de Témez, correspondiente a la tercera modelación, teniendo los parámetros de ajuste con mejor tendencia que en los otros casos, el año que no goza con una buena representación en alguno de los casos es el 1968 que queda muy por debajo de lo que realmente fue medido, el año 1965 fue sobreestimado de la misma manera por todas las modelaciones.

**Tabla 14.- Resultados parámetros e indicadores de ajuste subcuenca 18202**

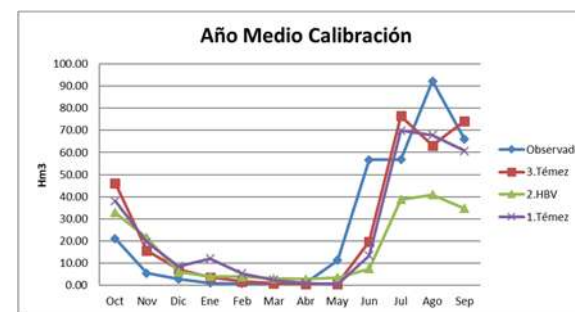
Estacion	Área (km2)	No. Modelac.	Modelo	Parámetros								Indicadores de ajuste						
				Témez		Hmáx		c		Imáx		α		NS	ln NS	r	SS	Promedio
				HBV	Beta	Fc	PWP	Lmax	k0	k1	k2	kperc						
18202	1682	1	Témez	218.42		0.2		150		0.819		0.555	0.584	0.752	0.999	0.7225		
		2	HBV	7	790	59.24	244	0.122	0.035	4E-04	0.842	0.274	0.343	0.534	0.958	0.5273		
		3	Témez	273.763		0.378		10		0.9		0.59	0.7	0.786	0.999	0.7688		



**Figura 34.- Escurrimiento mensual subcuenca 18202**



**Figura 35.- Escurrimientos anuales subcuenca 18202**



**Figura 36.- Año medio subcuenca 18202**

## Subcuenca 18452

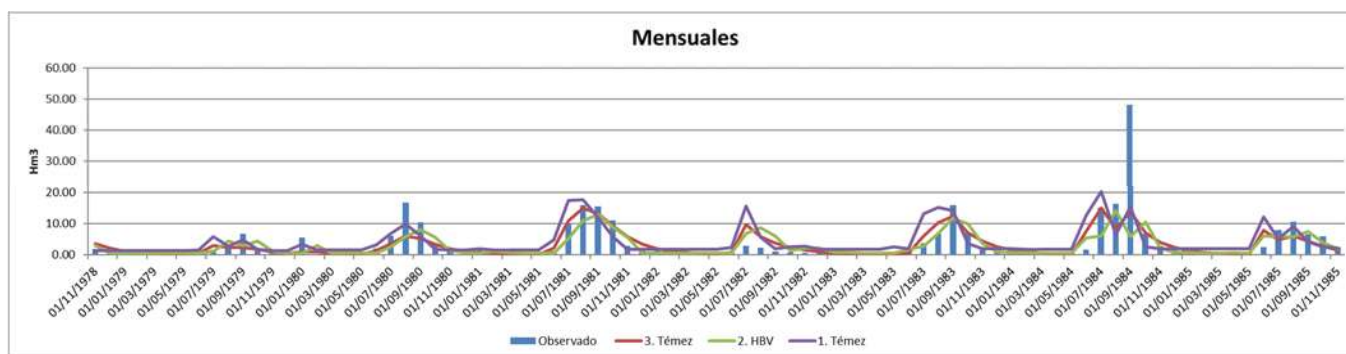
Esta subcuenca de modelación cubre una superficie de 247.965 km<sup>2</sup> su punto de salida se encuentra en la estación hidrométrica 18452, se encuentra presente en los municipios de Aguililla y Apatzingán del estado de Michoacán, litológicamente está constituido en su mayoría por roca sedimentaria (lutita, arenisca conglomerado), la cobertura vegetal está conformada en la parte alta de la cuenca al sur por bosque de pino con una cobertura vegetal del 50% y en la cuenca media y baja compuesto por selva baja caducifolia con baja cobertura vegetal con lo cual se puede aceptar una baja infiltración y un valor medio de Hmáx.

Sin duda en esta subcuenca se debe de realizar una mejor modelación, ya que el escurrimiento medido no sufre modificaciones aguas arriba de la cuenca, teniendo una población inferior a los mil habitantes que no extraen agua directamente del río ni para uso urbano, agrícola ni industrial y no existir ninguna obra que retenga el flujo.

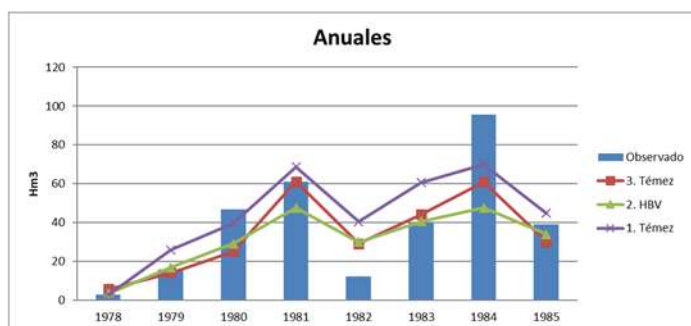
Con los dos modelos en las tres modelaciones, se observa un promedio de parámetros de ajuste muy bueno, pero el que mejor logró representar el volumen de escurrimiento es la tercer modelación del modelo de Témez a excepción del mes de septiembre del año de 1984 que se tiene un volumen observado muy alto y el modelo no logra representarlo. Se observa que en la tercer modelación el alfa corresponde a un valor de 0.556 lo que denota muy poca conexión río-acuífero. Se puede observar en los anuales y año medio, que las tres modelaciones muestran una buena tendencia, observándose el mejor ajuste en la tercer modelación de Témez a excepción del año de 1982 que se sobrestima y en 1984 que se subestima demasiado.

**Tabla 15.- Resultados parámetros e indicadores de ajuste subcuenca 18452**

Estación	Área (km <sup>2</sup> )	No. Modelac.	Modelo	Parámetros								Indicadores de ajuste					
				Témez	Hmáx		c		Imáx		α		NS	ln NS	r	SS	Promedio
				HBV	Beta	Fc	PWP	Lmax	k0	k1	k2	kperc					
18452	247.965	1	Témez		135.013		0.365		572.966		0.008		0.405	0.563	0.641	0.991	0.65
		2	HBV		3.741	488.6	0	35.7	0.159	0.067	2E-04	0.774	0.626	0.733	0.797	0.993	0.7873
		3	Témez		322.86		0.1		152.1		0.556		0.71	0.837	0.842	0.999	0.847



**Figura 37.- Escurrimiento mensual subcuenca 18452.**



**Figura 38.- Escurrimientos anuales subcuenca 18452**



**Figura 39.- Año medio**

### Subcuenca 18494

Es la última subcuenca de modelación superficial, esta zona es la cuenca baja de la cuenca del Río Tepalcatepec, aquí es donde se concentra todo el flujo que escurre por la cuenca a régimen natural y van anidadas todas las cuencas que ya se han calibrado, las microcuencas que se calibrarán suman un área de 3817 km<sup>2</sup>, se encuentran dentro de los municipios de Aguililla, Apatzingán, Buenavista, Nuevo Parangaricutiro, Parácuaro, Tancítaro y Tepalcatepec en el estado de Michoacán y Jilotlán de los Dolores en el estado de Jalisco.

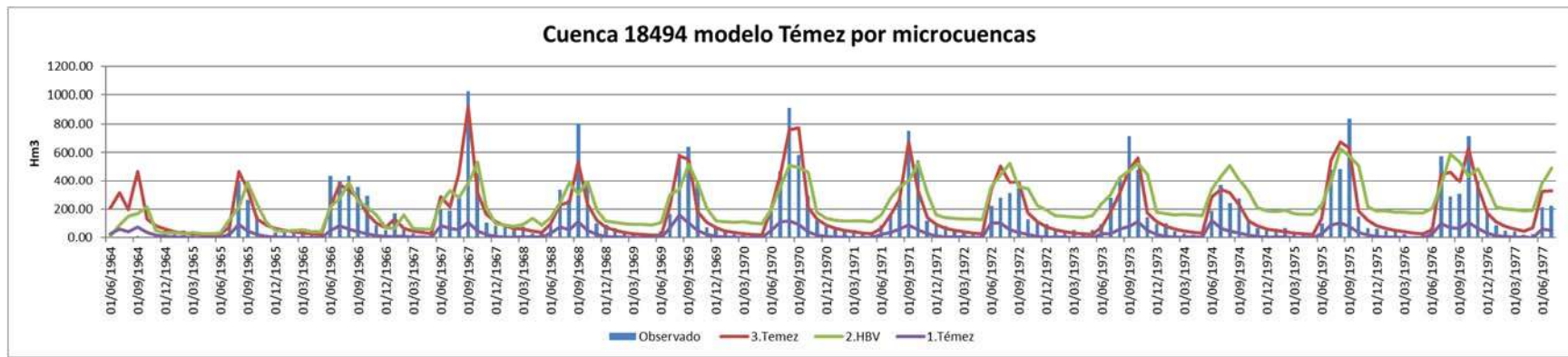
Litológicamente está constituido principalmente por roca ígnea extrusiva (arenisca conglomerado y brecha volcánica intermedia) y por material aluvial, su cobertura vegetal, está formado por zonas de manejo agrícola y selva baja caducifolia en el centro y en la zona noreste se tiene bosque de pino y encino.

La restitución a régimen natural de esta estación hidrométrica es la más ardua, ya que sufre la acción de 4 presas, 3 distritos de riego y la población total de la cuenca. Se puede observar en los resultados (figura 36,37 y 38) que la primer modelación quedó muy por debajo de los valores observados, ya que los observados con los que se estaba calibrando no se estaban afectando por la totalidad de acciones presentes en la cuenca.

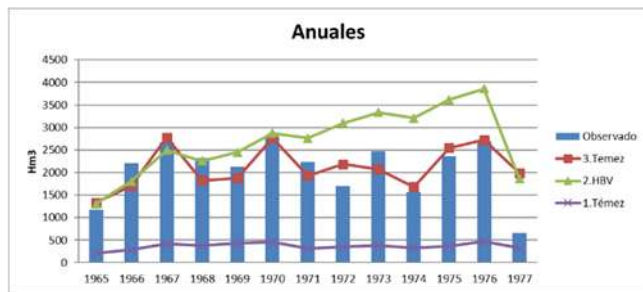
Se observa que la mejor calibración es sin duda la tercer modelación de Témez, se puede observar que el modelo HBV, pese a tener buen coeficiente de simetría, coeficiente de Pearson y Nash Sutcliffe, el Nash Sutcliffe modificado es malo, ya que está considerando un escurrimiento base irreal.

**Tabla 16.- Resultados parámetros e indicadores de ajuste subcuenca 18494**

Estación	Área (km <sup>2</sup> )	No. Modelac.	Modelo	Parámetros								Indicadores de ajuste					
				Témez	Hmáx		c		Imáx		α		NS	ln NS	r	SS	Promedio
				HBV	Beta	Fc	PWP	Lmax	k0	k1	k2	kperc					
18494	3817	1	Témez		218.418		0.2		150		0.819		0.555	0.584	0.752	0.99	0.7203
		2	HBV		2.567	493.5	86.86	160	0.162	0.01	1E-04	0.828	0.57	0.482	0.788	0.95	0.6975
		3	Témez		210.318		0.9		57.857		0.9		0.876	0.913	0.937	0.999	0.9313



**Figura 40.- Escorrentamiento mensual subcuenca 18494**



**Figura 41.- Escorrentamientos anuales subcuenca 18494**



**Figura 42.- Año medio**

## 7.2 Modelación Subterránea

La cuenca del Río Tepalcatepec tiene influencia en 5 acuíferos: Apatzingán, Valle de Juárez, Quitupan, Cotija y Colomos, los cuales se modelaron por separado, teniendo que el acuífero Apatzingán se modeló por medio del software AQUIVAL (método de autovalores) por contener un mayor número de acciones naturales y debe tratarse con mayor detalle por la presencia de bombeos, manantiales, mayor número de poblaciones, industrias, un distrito de riego más grande como lo es el DR 97 Lázaro Cárdenas, para precisar numéricamente el funcionamiento de este. El resto de los acuíferos se modeló como unicelulares.

Para poder implementar el modelo de autovalores se requiere una discretización espacial distribuida a través de celdas que pueden ser o no uniformes, dependiendo de precisión con que se necesiten los datos simulados.

El método de autovalores requiere que las celdas con influencia en el acuífero sean caracterizadas con las propiedades de transmisividad y coeficiente de almacenamiento siendo estos parámetros ponderados dentro de la celda y extraídos de los tipos de rocas que se encuentra en el acuífero.

**Tabla 17.- Conductividad y coeficiente de almacenamiento por tipo de roca (USGS,2002)**

Tipo de roca	conductividad			coeficiente de almacenamiento		
	max	min	prom	max	min	prom
arenisca- conglomerado	0.00328	3.3	1.65164	0.001	0.001	0.001
caliza	0.0131	0.328	0.17055		0.00005	0.00005
complejo metamorfico	0.0985	0.328	0.21325	0.0001	0.00005	0.000075
conglomerado	0.0328	3.3	1.6664	0.0001	0.00005	0.000075
lutita	0.0328	3.3	1.6664		0.00005	0.00005
lutita arenisca	0.0328	3.3	1.6664	0.0001	0.0001	0.0001
Material de deposito	3	100	51.5	0.001	0.0001	0.00055
ígneas extrusivas ácidas	0.328	3.28	1.804	0.0001	0.00005	0.000075
ígneas extrusivas básicas	0.328	3.28	1.804	0.0001	0.00005	0.000075
ígneas extrusivas intermedias	0.328	3.28	1.804	0.0001	0.00005	0.000075
ígneas intrusivas ácidas	0.328	3.28	1.804	0.0001	0.00005	0.000075
ígneas intrusivas intermedias	0.328	3.28	1.804	0.0001	0.00005	0.000075

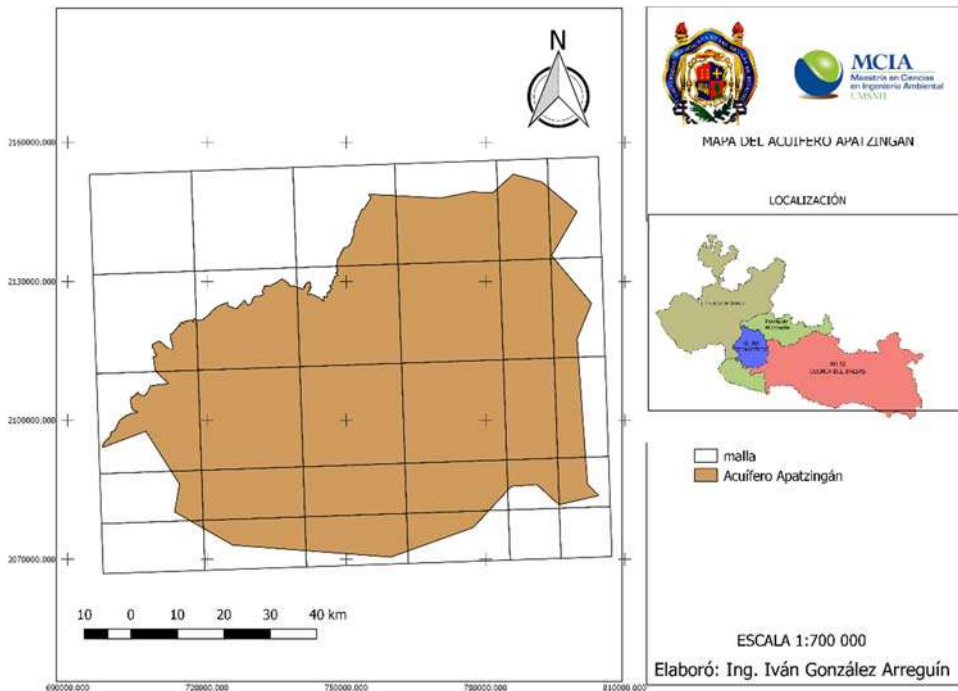
De la misma manera, cada celda debe tener una acción elemental (así denominada en AQUIVAL). Se deben de caracterizar cada una de las acciones elementales existentes en el acuífero para ser posteriormente poder ser usadas en SIMGES, siendo las siguientes:

- Recarga natural por infiltración.
- Recarga por infiltración en los módulos de los distritos de riego.
- Bombeo de los módulos 2, 3, 5, 5B, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12.
- Bombeo agrícola fuera de los módulos de riego.
- Bombeos Urbanos.
- Bombeo industrial.

#### Modelación Subterránea 1.-

Se realizó una primera modelación, tomando en cuenta para la calibración datos hidrométricos de manantiales que se encontraban dentro de la cuenca (manantial de Buenavista, Apatzingán y Parácuaro), intentando ingresar valores de coeficiente de almacenamiento y transmisividad para cada celda de tal manera que al realizar el cálculo, los gastos en los manantiales calculados sean numéricamente iguales a los observados.

En la figura 16 se muestra la distribución de las celdas del acuífero Apatzingán con 12 celdas de un tamaño de 21.91km x 21.51 km, 6 celdas de 21.71 km x 11.05, 6 celdas de 21.51x 11.455 y 4 de 11.05 x 11.455, se realizaron en diferentes tamaños intentando tomar todos los detalles del acuífero . Estas celdas serán numeradas para su utilización en el modelo subterráneo, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo solo si tienen influencia dentro del acuífero (Figura 17).

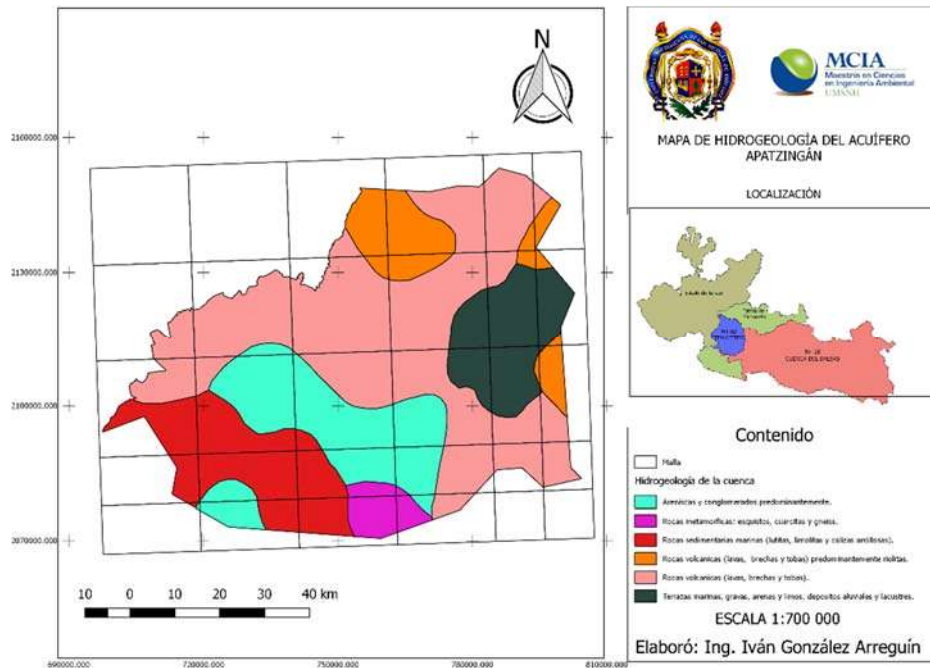


**Figura 43.-** Discretización del acuífero Apatzingán en celdas.

0	0	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	2
0	1	1	1	0	0

**Figura 44 .-** Números asignados por celdas, siendo 0=celda inactiva, 1=celda activa, 2= celda de contorno

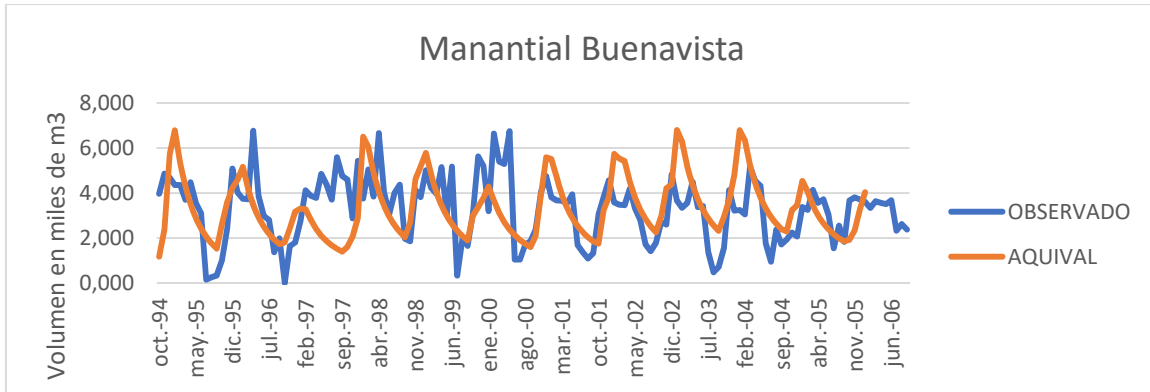
Mientras tanto el valor del espesor del acuífero será tomado de 200 metros debido a que existen registros de CONAGUA en donde se habla de un espesor promedio del acuífero Apatzingán de ese tamaño.



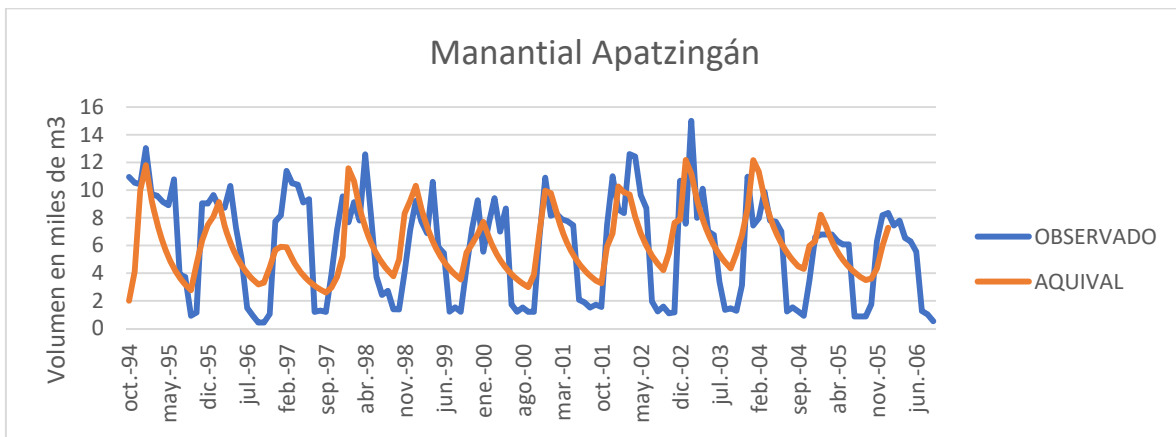
**Figura 45.- Hidrogeología acuífero Apatzingán**

Una vez ingresados todos los datos de los parámetros hidrodinámicos y de las acciones elementales al modelo, se procede a la calibración del mismo variando los coeficientes de conductividad y almacenamiento entre los rangos establecidos para cada tipo de roca. la calibración del modelo se realizará usando volúmenes medios mensuales aforados de tres manantiales (Apatzingán, Parácuaro y Buenavista. Datos que fueron obtenidos del distrito de riego 097 Lázaro Cárdenas.

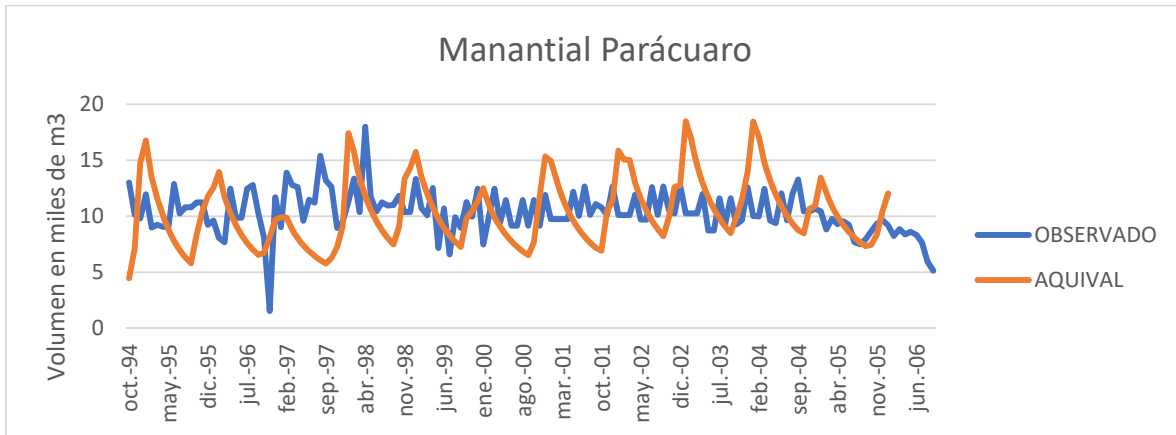
A continuación, se muestran los resultados de la calibración de cada uno de los acuíferos, así como sus volúmenes aforados y calculados.



**Figura 46.-** Gráfico de volúmenes observados y calculados del Manantial Buenavista



**Figura 47.-** Gráfico de volúmenes observados y calculados del Manantial Apatzingán



**Figura 48.-** Gráfico de volúmenes observados y calculados del Manantial Parácuaro

**Tabla 18.- Resumen de resultados de modelación de acuífero Apatzingán**

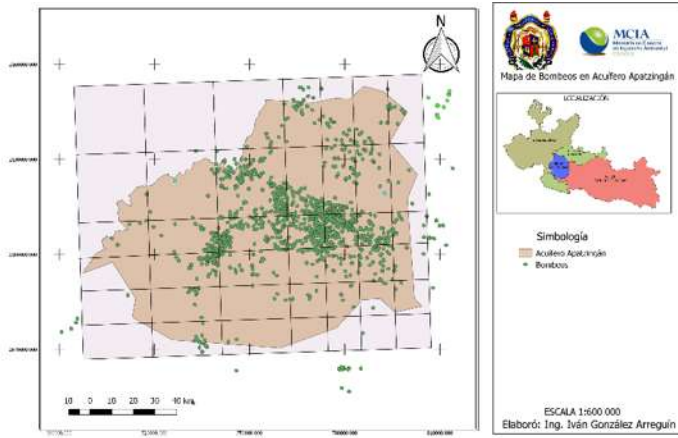
Manantial	Vol. Prom. Observado	Vol. Prom. Calculado	Correlación	Error (%)
Buenavista	3.28	3.34	-0.73	1.74
Apatzingán	6.01	6.05	-0.78	0.71
Parácuaro	10.35	10.37	0.05	0.12

#### Modelación subterránea 2.

Dado que la calibración del manantial de Parácuaro de la primera modelación los resultados no fueron satisfactorios y al confirmar en una visita al Distrito de Riego 097 que los datos hidrométricos con los que se contaba de las estaciones hidrométricas eran de tomas agrícolas y no el escurrimiento que realmente se pasaba por el cauce de los manantiales, se realizó otra modelación de autovalores en AQUIVAL, partiendo de que en toda la cuenca existe un clima con lluvias en verano, el escurrimiento que se presenta el resto del año corresponde al aporte del acuífero. También se considera que solo existe conexión río acuífero solamente en el acuífero Apatzingán.

De esta manera se estaría omitiendo para esta segunda modelación la calibración de los manantiales y se calibraría solamente el escurrimiento calculado con el escurrimiento base que el acuífero nos aporte, tomando en cuenta como salidas de acuífero el escurrimiento que también nos estén aportando los manantiales. (el escurrimiento de los manantiales forma parte del escurrimiento base del acuífero).

Para esta modelación se tienen ahora 6 filas y 7 columnas, se agregó una fila y una columna más respecto a la primera modelación, dividiendo en dos la fila inferior y la columna derecha, considerando importante esta operación para discretizar más esa zona donde existe mayor cantidad de bombas y acciones. El espesor del acuífero se consideró en toda su superficie de 300 metros.



0	0	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	2	1	0
0	1	1	1	1	2	0
0	1	1	1	1	0	0

**Figura 49 y Figura 50.-** Mapa de nuevo mallado para modelación subterránea 2.

0	0	8118	8118	9000	9000	8118
9000	9000	9000	9000	22500	22500	22500
9000	7425	9000	9000	22500	22500	8118
9000	225000	7425	7425	9000	9000	0
0	225000	7425	7425	9000	9000	0
0	7425	225000	959.63	9000	0	0

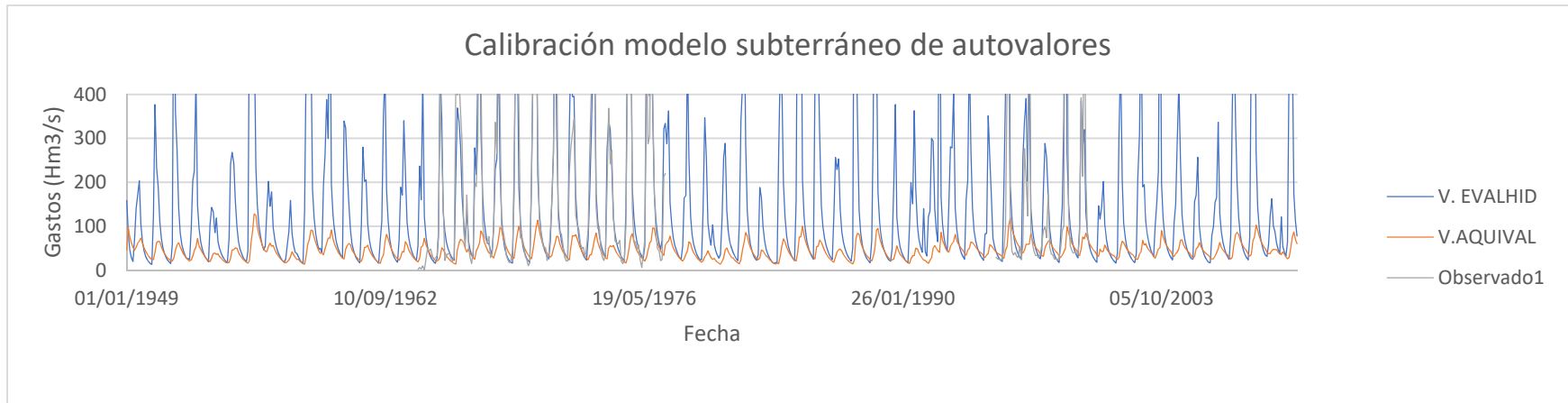
		0.00015	0.0002			0.0002
0	0			0.0002	0.0002	
0.00017	0.00017	0.00017	0.0002	0.0011	0.0011	0.0011
0.00017	0.0011	0.00017	0.0002	0.0011	0.0011	0.0002
0.00017	0.0011	0.0011	0.0011	0.0002	0.0002	0
0	0.0011	0.0011	0.0011	0.0002	0.0002	0
0	0.0011	0.0011	0.0002	0.0002	0	0

**Figura 51.-** Distribución de transmisividades

**Figura 52.-** Distribución de s

**Tabla 19.-** Valores correspondientes de conductividades hidráulica, transmisividad y coeficientes de almacenamiento para cada tipo de roca presente en el acuífero

tipo de roca	k(m/día)	T(m2/día)	s
ígnea extrusiva riolita	27.06	8118	0.0002
roca volcánica	30	9000	0.0002
sedimentarias	750	225000	0.0011
areniscas y conglomerados	24.75	7425	0.0011
depositos aluviales y lacustre	75	22500	0.0011
roca metamórfica	3.19875	959.625	0.0002



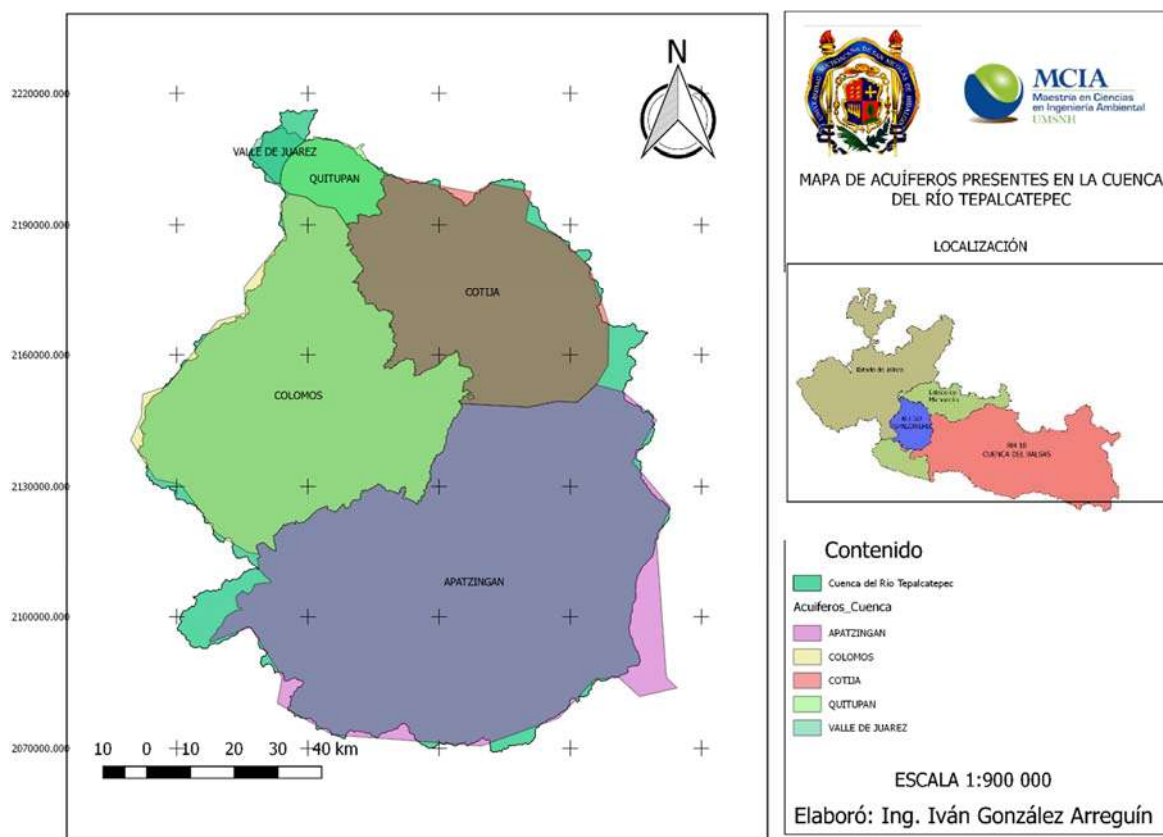
**Figura 53.-** Modelo subterráneo de autovalores

Se puede observar en la calibración, la línea azul, el volumen generado con el modelo calibrado y validado de modelación superficial de EVALHID que nos proporciona el escurrimiento superficial de toda la cuenca, por otro lado, la línea verde, con los observados en la estación hidrométrica 18494 que es la estación el punto de salida de la cenca y por último, la línea roja el escurrimiento generado por el modelo de autovalores AQUIVAL, donde se observa que el escurrimiento base superficial del Río Tepalcatepec en la estación hidrométrica 18494 es representado gráficamente de manera satisfactoria, quedando representado el escurrimiento base que es el generado por la conexión río-acuífero.

### 7.3 Modelación de la Gestión Hídrica

Para definir el modelo de gestión se toman en cuenta todas las entradas (aportaciones) y salidas (demandas) de la cuenca. Además, se debe conocer la infraestructura de regulación en toda la zona. En el caso particular de la cuenca del río Tepalcatepec se cuenta con las siguientes propiedades:

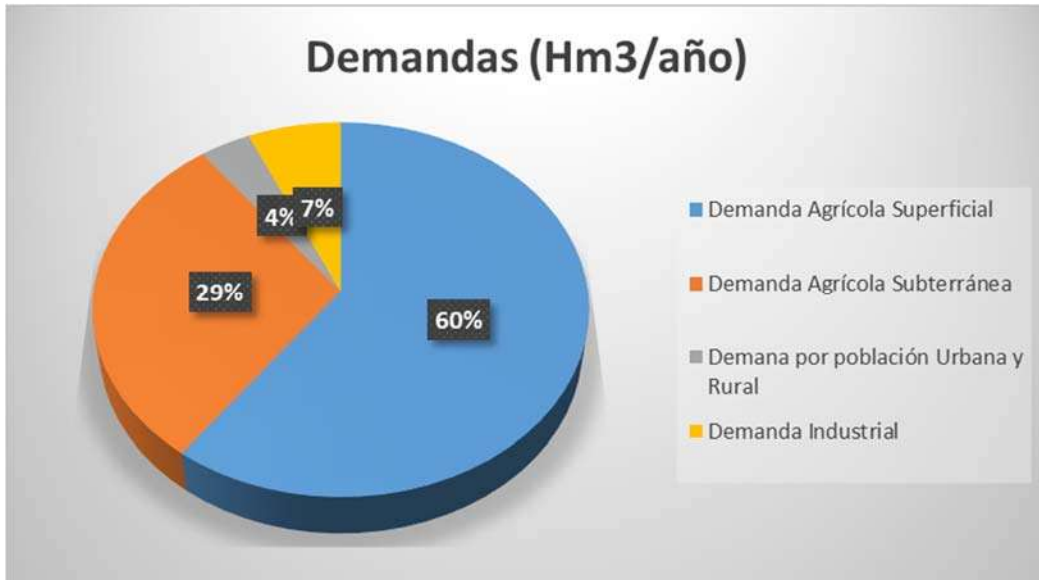
- Cinco acuíferos (1440, 1439, 1438, 1620 y 1622)(Figura 22)



**Figura 54.-** Acuíferos presentes en la cuenca del Río Tepalcatepec

**Tabla 20.-** Demandas en la cuenca del Río Tepalcatepec

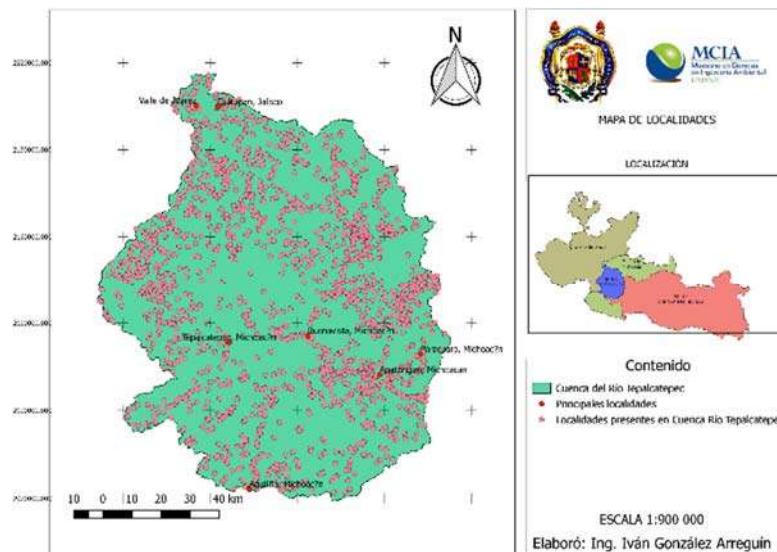
	Demanda (Hm <sup>3</sup> /año)
Demanda Agrícola Superficial	522.06
Demanda Agrícola Subterránea	257
Demana por población Urbana y Rural	31.66
Demanda Industrial	57.86



**Figura 55.-** Gráfica de demandas dentro de la CHRT

- -Demanda Urbana:

De las poblaciones presentes en la cuenca del río Tepalcatepec (Figura 23), se tuvo que hacer una simplificación para fines de modelado, en la cual se fueron agrupando las localidades por municipio posteriormente a haber hecho la proyección de población se multiplicó por la dotación del consumo para cada población dependiendo del clima con el que cuente y posición social (popular medio o residencial) y se dieron de alta en SIMGES, en la figura 56 se observa la ubicación de cada una de las poblaciones presentes en la cuenca, sumando un total de 1564, en la figura 57 se observa el mapa de municipios



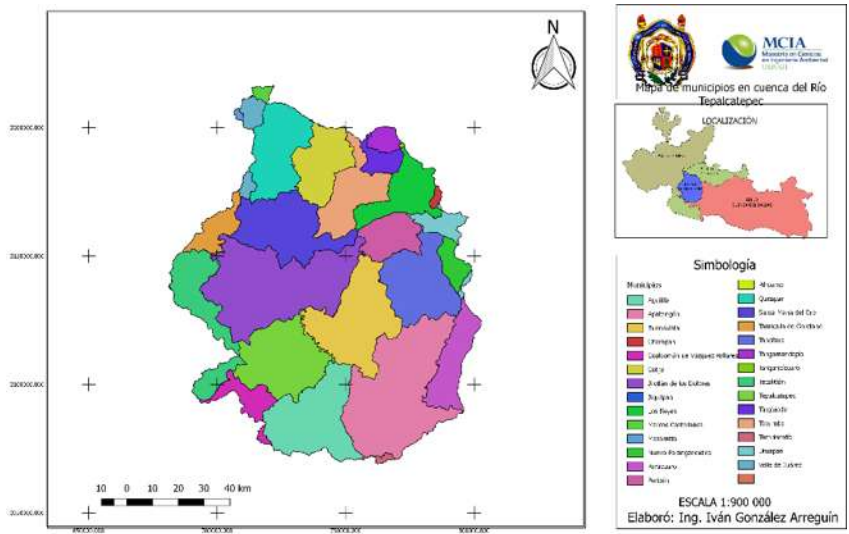
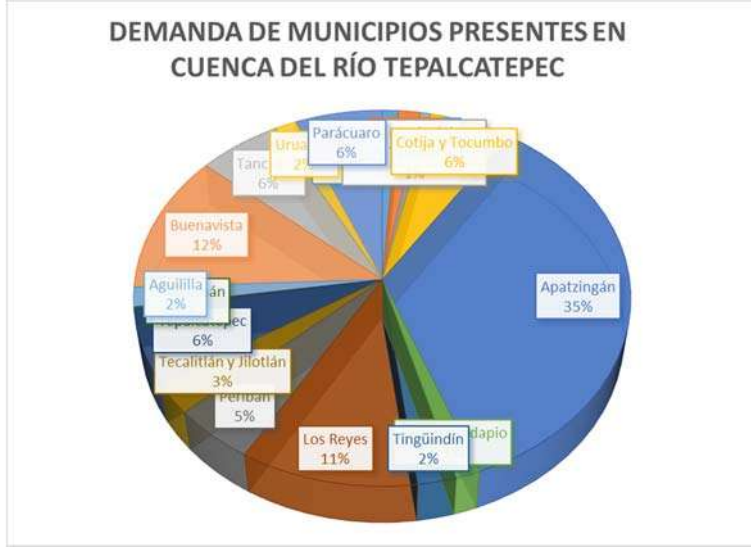


Figura 56 y Figura 57.- Mapas de localidades y división municipal en la CHRT



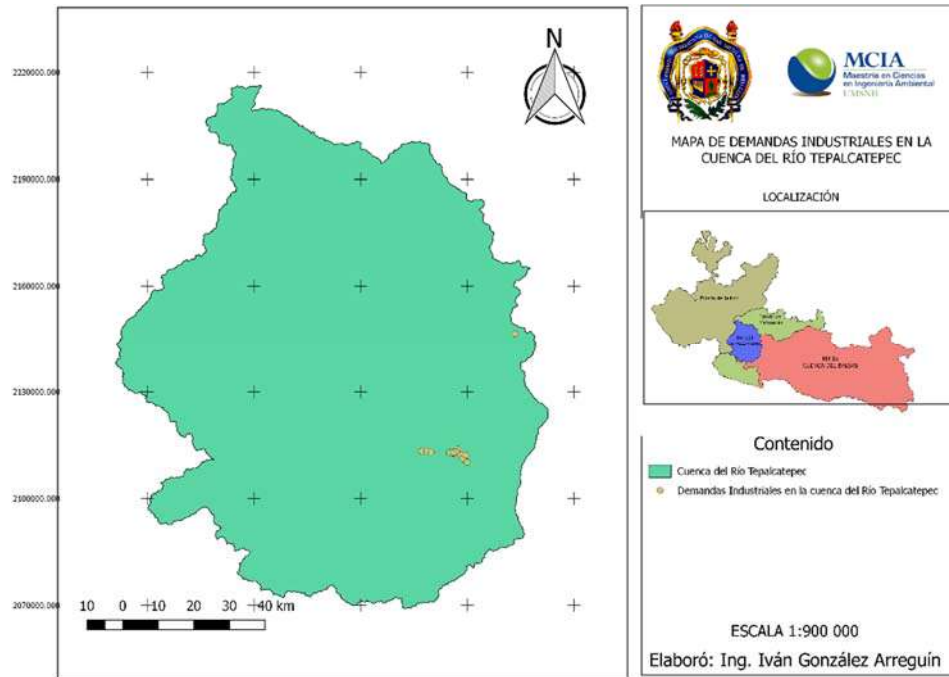
Municipio	Demanda (hm3/año)
Mazamita y Valle de Juárez	0.272146985
Quitupan	0.361820829
Santa María del Oro y Tamazula	0.17597969
Cotija y Tocumbo	1.376748196
Apatzingán	8.1871074
Tangamandapio	0.33696
Tingüindín	0.5405256
Los Reyes	2.477696612
Peribán	1.156833336
Tecalitlán y Jilotlán	0.624109874
Tepalcatepec	1.514077067
Coalcomán	0.040507867
Aguililla	0.391526128
Buenavista	2.798803272
Tancítaro	1.392992316
Uruapan	0.355932
Parácuaro	1.468354148
Total	23.47212132

Figura 58.- Gráfica de población presente

Tabla 21.- Demanda por municipios

- -Demanda industrial.-

A través de la base de datos del REPDA, se obtuvieron las distintas demandas industriales que se tienen presentes en la cuenca, que principalmente se encuentran en el acuífero Apatzingán.



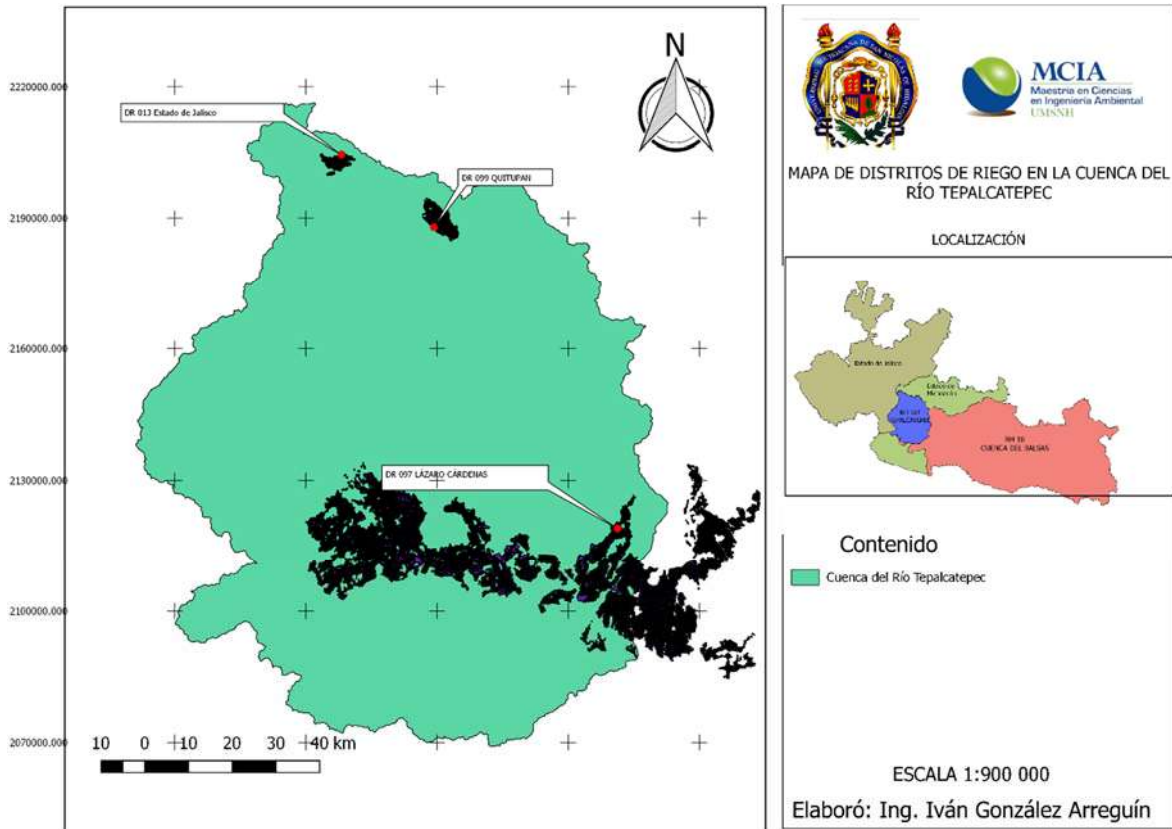
**Figura 59.- Demandas industriales en la CHRT**

**Tabla 22.- Títulos de concesión de tipo industrial en la CHRT**

Volumen (m <sup>3</sup> /año)	Uso que ampara el título	TITULAR O NOMBRE DE LA EMPRESA	TITULO
14,159.00	INDUSTRIAL	ARISTEO BUCIO CHAVEZ	04MCH102543/18FMGE04
15,768.00	INDUSTRIAL	ARTEMIO OCHOA GONZALEZ	04MCH119765/18FMGE02
162,000.00	INDUSTRIAL	BEBIDAS AZTECA DE OCCIDENTE, S.A. DE .C.V.	4MCH100004/18FMGE94
97,200.00	INDUSTRIAL	BEBIDAS AZTECA DE OCCIDENTE, S.A. DE .C.V.	4MCH100005/18FMGE94
17,000.00	INDUSTRIAL	CARLOS ALBERTO UREÑA ZEPEDA	04MCH116965/18FMDL12
10,512.00	INDUSTRIAL	CITRICOS DE APATZINGAN, S. DE P.R. DE R.L.	04MCH118440/18FMGE00
66,000.00	INDUSTRIAL	CITROJUGO, S. A. DE C. V.	04MCH150368/18FMDL12
60,000.00	INDUSTRIAL	CITROLIM, S. A. DE C. V.	04MCH123729/18FMDL13
300,000.00	INDUSTRIAL	DANISCO MEXICANA, S.A. DE C.V.	04MCH101470/18FMGE05
22,320.00	INDUSTRIAL	FABRICA DE HIELO PACOMER S. A. DE C. V.	04MCH124169/18FMDL12
24,800.00	INDUSTRIAL	FABRICA DE HIELO PACOMER, S.A. DE C.V.	04MCH106957/18FMGE04
15,000.00	AGROINDUSTRIAL	HUGO CAMPOS MOLINA	4MCH102692/18BMGE95
6,000.00	INDUSTRIAL	LIMONEROS ASOCIADOS DE APATZINGAN, S.A. DE C.V.	04MCH121871/18FMGR03
2,496.00	INDUSTRIAL	RIGOBERTO LOPEZ VALLE	04MCH121954/18FMGE04
4,536.00	INDUSTRIAL	SOCIEDAD DE PRODUCTORES AGRICOLAS DE LIMON S.P.R. DE R.I	04MCH124368/18FPDL09

- Módulos de riego (MR) de los Distritos de Riego (DR) 099, 097 y 013

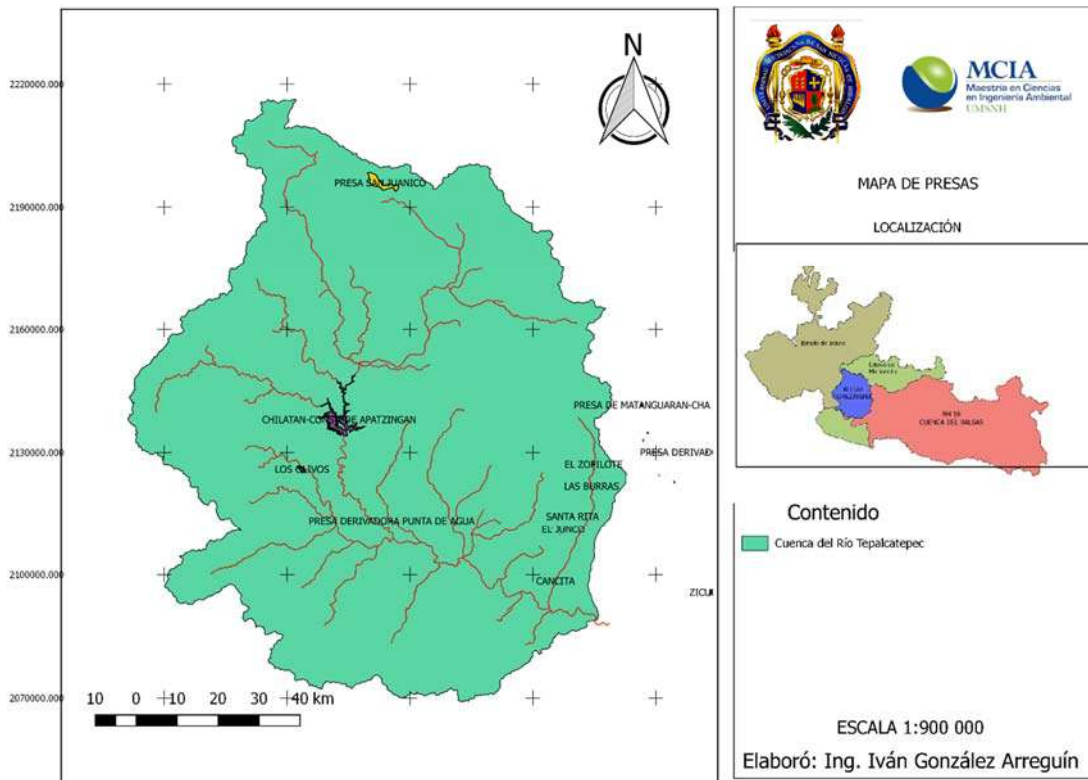
Existen actualmente 3 DR dentro de la zona de estudio; el distrito 013 Estado de Jalisco del cual solo el módulo Quitupán se encuentra dentro de la cuenca, el 099 La Magdalena y el 097 Lázaro Cárdenas (Figura 25).



*Figura 60.- Distritos de riego presentes en la cuenca del Río Tepalcatepec*

- Cuatro presas (San Juanico, Vicente Villaseñor, los Olivos y Chilatlán):

En la Figura 26 se pueden observar las principales presas que se tienen en la cuenca, y en la tabla 7, se pueden observar sus características de almacenamiento.



**Figura 61.-** Presas presentes en la cuenca del Río Tepalcatepec

**Tabla 23.-** Características presas

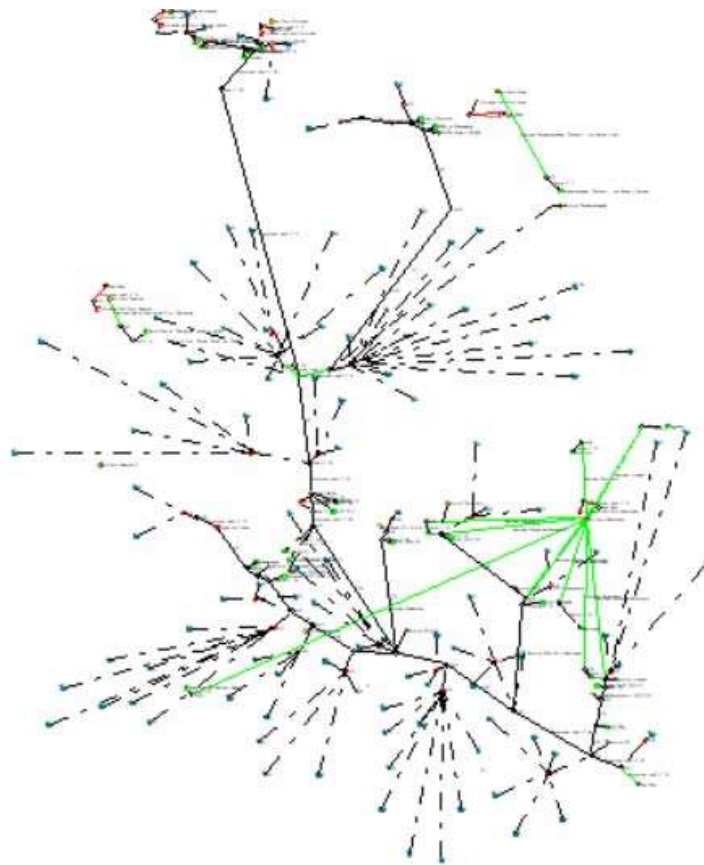
Nombre Presa	CAPACIDADES (Hm3)			
	NAME	NAMO	NAMINO	VOLUMEN ÚTIL
Vicente Villa Señor	22.5	19	3	16
Olivos	38.08	29.28	4.28	25
Olivos bat. 2012	16.27	10.26	0.53	9.73
San Juanico	28.15	21.75	1.54	20.21
Chilatán	817.096	590.041	112.448	447.5934

- Bombeos concesionados en los acuíferos
- Aportaciones intermedia a lo largo de todo el río Tepalcatepec

Se ha creado, modelado y calibrado el modelo de Gestión en SIMGES con todos sus elementos necesarios, siendo estos:

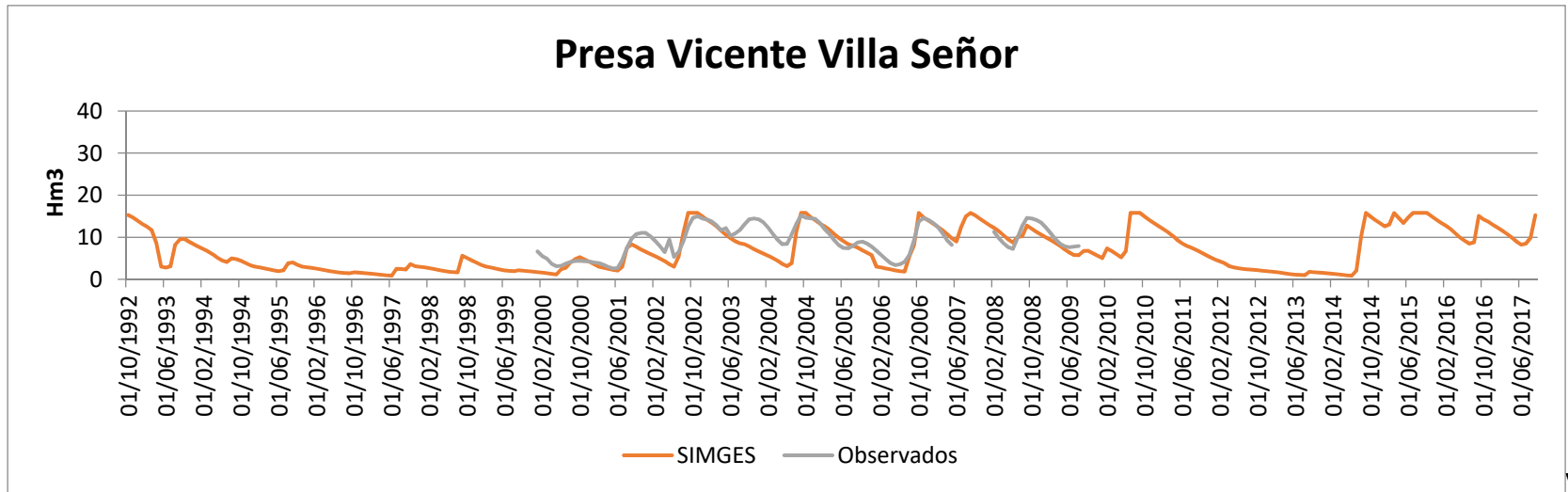
- NUDOS: 58
- EMBALSES: 4

- TRAMOS RIO TIPO 1: 35
- TRAMOS RIO TIPO 2: 5
- TRAMOS RIO TIPO 3: 5
- APORTACIONES INTERMEDIAS: 29
- DEMANDAS CONSUNTIVAS: 24
- DEMANDAS NO CONSUNTIVAS (central hidroeléctrica): 1
- ACUIFEROS: 5
- N.RETORNOS: 17

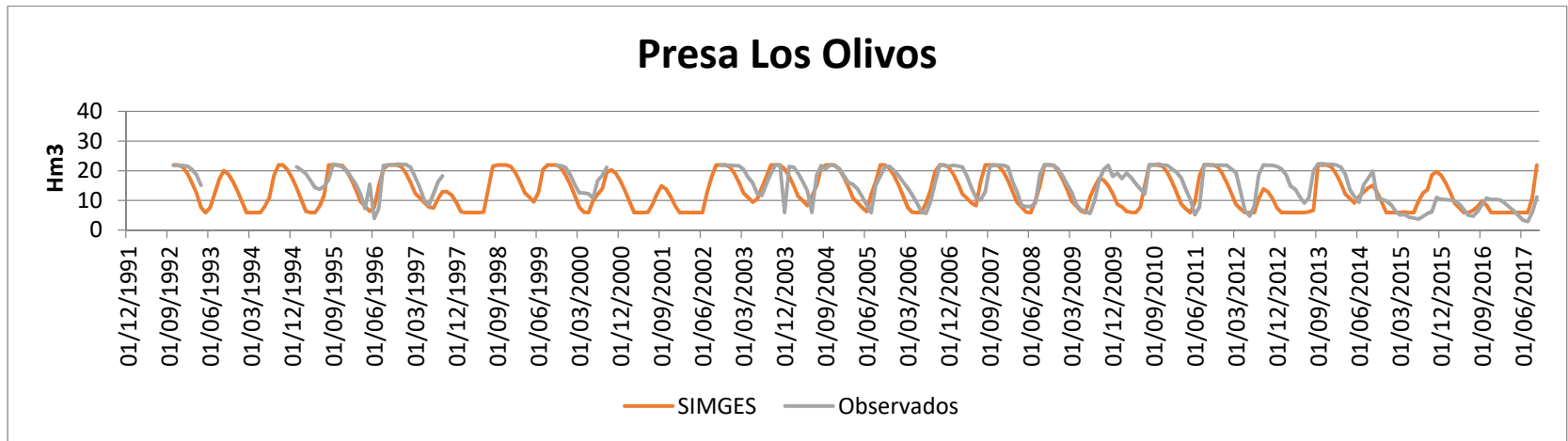


**Figura 62.- Topología de simulación conjunta en SIMGES**

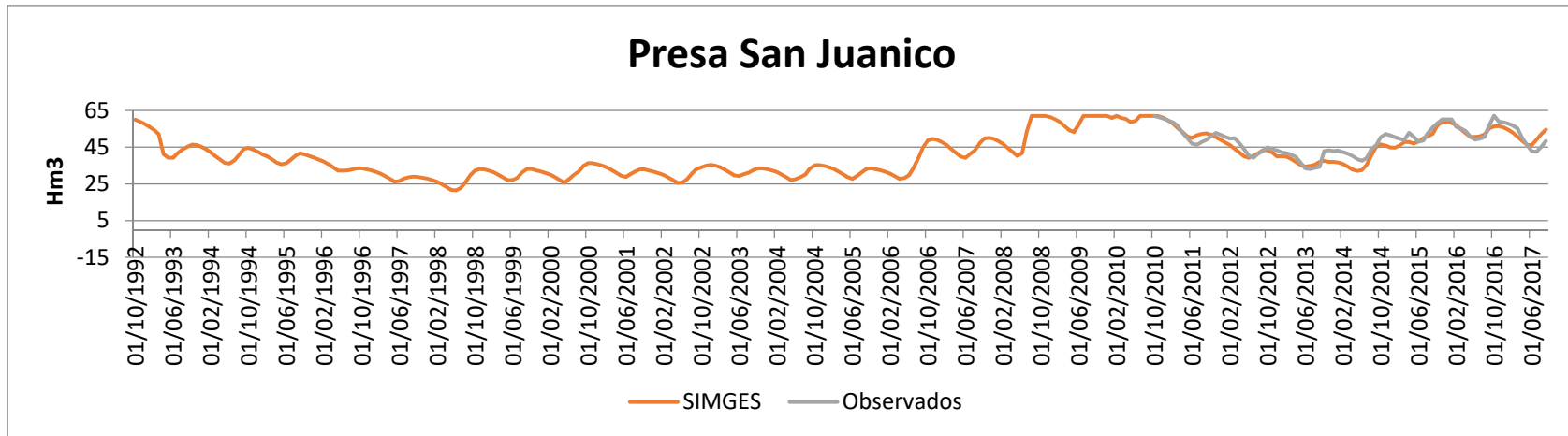
En las figuras 63,64,65 y 66 se pueden observar las calibraciones correspondientes a las presas presentes en la Cuenca del Río Tepalcatepec, para el modelo de SIMGES, se buscó una calibración gráfica donde se pueda observar una tendencia gráfica de simulados contra observados.



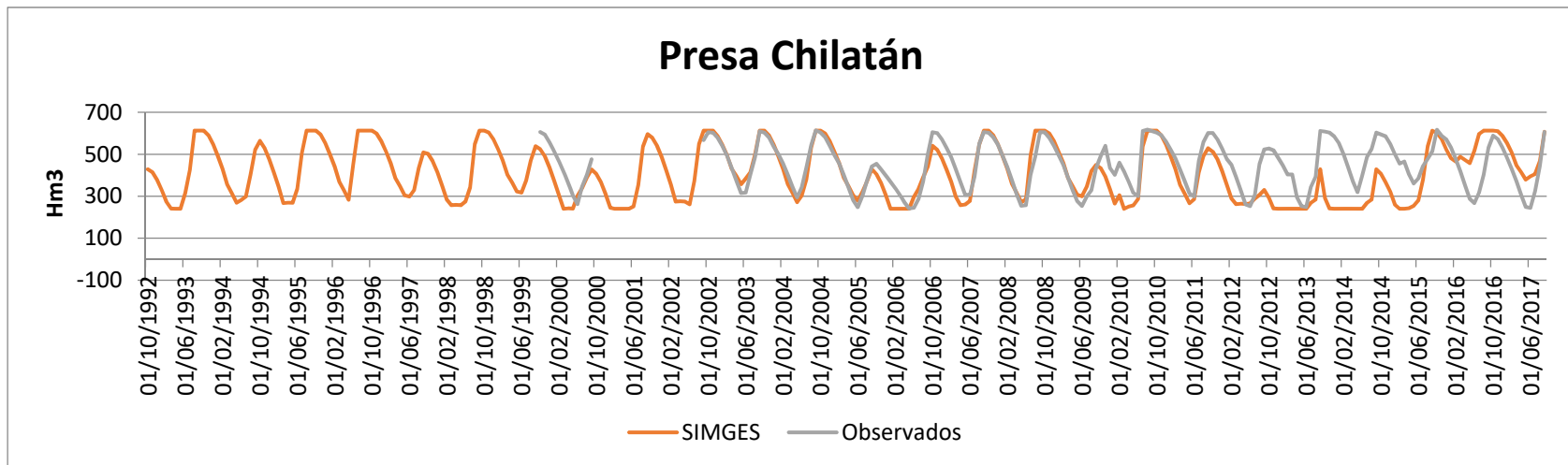
**Figura 63.-** Calibración presa Vicente Villa Señor



**Figura 64.-** Calibración presa Los Olivos



**Figura 65.-** Calibración presa San Juanico

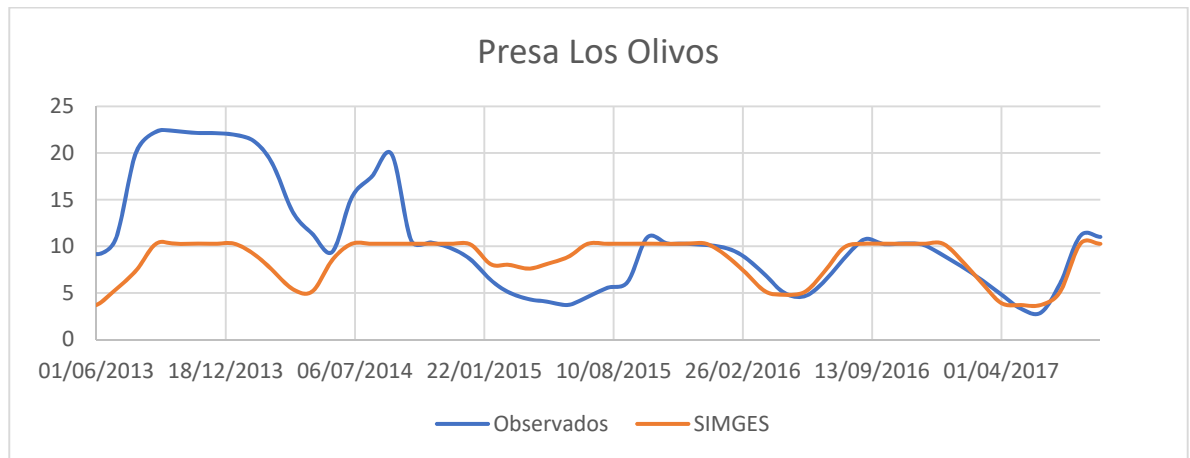


**Figura 66.-** Calibración presa Chilatán

Presa Vicente Villa Señor: Tiene un volumen útil de 16 hm<sup>3</sup>, se obtuvo una calibración regular utilizando el periodo entre el 2000 y el 2007 que es donde se tiene información de observados, logrando mayor semejanza en los años hidrológicos 2002-2003, 2004-2005 y 2008-2009, la calibración se acepta porque se representa bien la sequía de los años hidrológicos 2000-2001, 2001-2002 y 2008-2009 y el resto de los años donde la presa se llena queda bien representada. Los coeficientes de los indicadores de ajuste se muestran en la tabla 22, se observa un promedio de 0.637 mostrando el valor más bajo en el Nash-Sutcliffe modificado y el Nash Sutcliffe debido a la falta de coincidencia de datos del 2004, esta falta de coincidencia se debe a que se puede ver una sequía el año 2003 y la gestión de las tomas cambia al encontrarse en tal situación.

Presa Los Olivos: Tiene un volumen útil de 20.21 hm<sup>3</sup>, la mejor calibración se logra sin duda del año 2005 al 2009 contando con ajuste malo en Nash-Sutcliffe y Nash-Sutcliffe modificado pero un muy buen ajuste en Pearson y simetría, el peor ajuste se observa en la última época a partir del año 2012, debido a que se registró una nueva batimetría, en la que se encuentra que se ha perdido una capacidad de almacenamiento de más del 60%, por lo tanto se tuvo que hacer un cambio en la gestión de recursos hídricos en esta cuenca y en la presa paralela (Presa Chilatán). Para atender este cambio se modificó el modelo de gestión, cambiando la curva de elevaciones-capacidades de la presa. Al tener una menor capacidad útil de esta la asignación de recursos tuvo que ser menor, reduciéndose un 75%, anteriormente se cubría un 30% de la demanda requerida por el módulo de riego 11 del Distrito de Riego 097 "Lázaro Cárdenas y ahora solo pudiendo cubrir un 7.5% de la demanda de este y además iniciando a suministrar agua a partir del mes de enero, siendo más cuidadosos en el suministro del recurso, la nueva calibración se muestra en la figura 67, donde se observa un ajuste en el periodo del 2015 al 2017, con un muy buen comportamiento de los indicadores de ajuste (tabla 23), se observa que en el periodo de 2012 al 2015, ninguno de los dos modelos se ajusta a la realidad, esto debido a que los gestores correspondientes se encontraban realizando pruebas para lograr una óptima distribución de recursos, pero se observa que lo hacen a

prueba y error y no usando una herramienta informática como la que en este trabajo se muestra.



**Figura 67.- Segunda Calibración Presa Los Olivos**

Presas San Juanico: Con un volumen útil de 30 hm<sup>3</sup>, ocupa el segundo lugar en importancia, el inconveniente que se tiene es que únicamente se cuenta con información del 2010 al 2017, a pesar de estar operando desde 1974, se realizó la calibración obteniendo una buena tendencia, siendo una presa que se llena cada multianual y no anual como el resto, su ciclo multianual se pudo representar de buena manera del 2010 al 2017 donde empieza a operar llena en el 2010, en el año 2014 sufre un descenso importante y logra la recuperación en el año 2017. Sus indicadores de ajuste son los mejores obtenidos, con un promedio de 0.848, teniendo valores muy buenos en todos los casos.

Presas Chilatan: Su nombre oficial es Constitución de Apatzingán de 1814, es la presa más grande y más importante del sistema de recursos hídricos, con un volumen útil de 480 hectómetros cúbicos, siendo 16 veces más grande que la que ocupa el segundo lugar, su calibración gráfica es aceptable se representan muy bien la mayoría de los años en los que la presa se llena en época húmeda y llega a su NAMINO en estiaje, aunque no a la perfección las sequías de los años hidrológicos 2005-2006 y 2009-2010, sus indicadores de ajuste en el ciclo del 2002 al 2011 son muy buenos, el problema empieza en el 2012, cuando se dan cuenta del

ateramiento de la presa paralela (Los Olivos) y cambia la gestión, disminuyendo las tomas y la dotación a la hidroeléctrica.

**Tabla 24.- Indicadores de ajuste volúmenes de presa.**

Nombre Presa	Periodo	Nash-Sutcliffe	Nash-Sutcliffe modificado	Pearson	Simetría	Promedio
Vicente Villa Señor	01/12/2002---01/06/2012	0.429	0.331	0.824	0.965	0.637
Olivos	01/12/2002---01/06/2012	0.202	0.126	0.679	0.983	0.497
Olivos bat. 2012	01/10/2015---01/09/2017	0.922	0.917	0.960	1.000	0.950
San Juanico	01/10/2010---01/09/2017	0.761	0.722	0.912	0.912	0.827
Chilatán	01/10/2002---01/08/2011	0.751	0.673	0.899	0.998	0.830

Teniendo las presas calibradas al estado actual (2017) se tiene el modelo preparado para realizar la modelación de la gestión de sequías.

#### 7.4.- Generación de series sintéticas de caudales

Se pueden utilizar diversas formulaciones de modelos hidrológicos que se han empleado en la práctica. Para el presente trabajo se ha adoptado el uso de modelos autorregresivos. Estos modelos, al igual que la mayor parte de los demás existentes se preservan de forma explícita los estadísticos básicos de la serie histórica, como son la media, desviación típica, y la estructura de autocorrelación hasta el grado del modelo.

Para la generación de series sintéticas de caudales se utilizó la herramienta MASHWIN (descrita en capítulo 4.1.4), utilizando modelos autorregresivos de orden 1 para las 29 series de aportaciones de gasto utilizadas en el modelo de SIMGES, en la figura 68 se observa cuáles subcuencas pertenecen a cada una de las aportaciones, en la tabla 24 se observan los estadísticos básicos de cada una de las series de aportaciones.

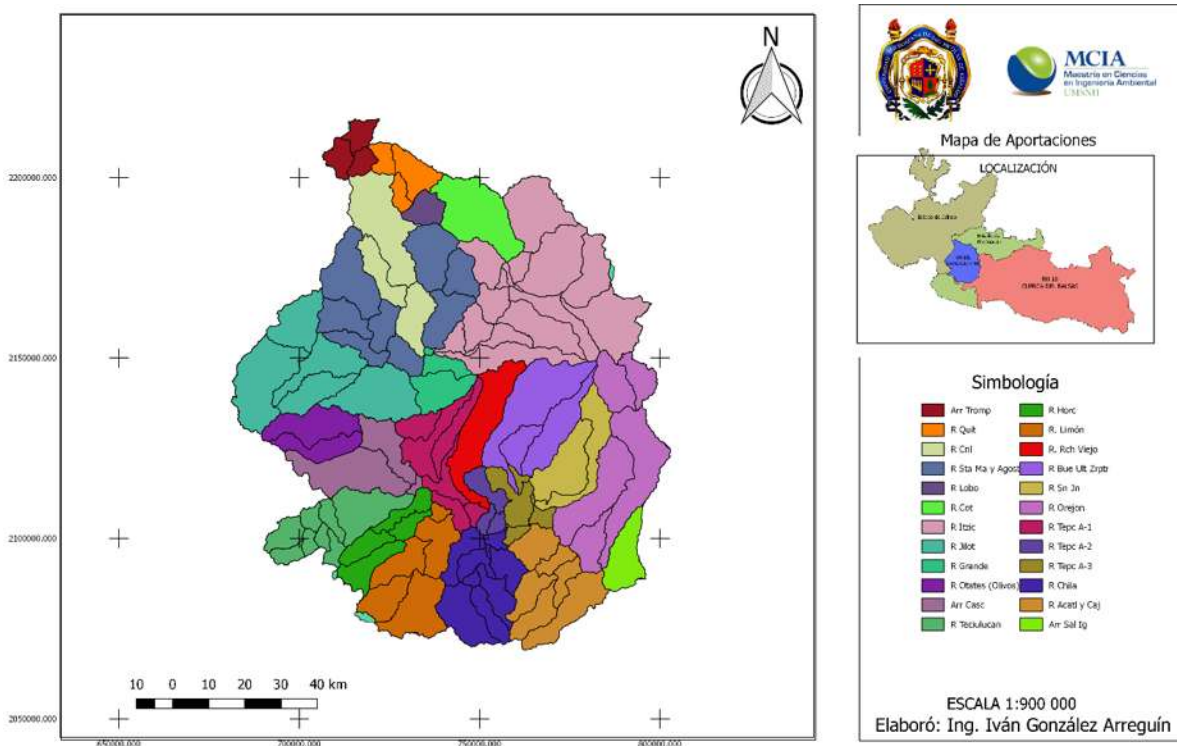


Figura 68.- Mapa de aportaciones

La normalización se realizó utilizando las ecuaciones 4.4 a 4.7 de forma mensual. La selección de la ecuación a utilizar en cada mes, se realizó evaluando su intervalo de normalidad del coeficiente de sesgo, (ecs. 4.8 y 4.9), de manera que la ecuación de normalización utilizada genere un coeficiente de sesgo entre los límites, en la tabla 24 se muestran los resultados de las ecuaciones utilizadas para la normalización de las distintas aportaciones.

**Tabla 25.- Resumen de estadísticos mensuales y función elegida de normalización de aportaciones**

NOMBRE CORRIENTE	Reducción	MEDIA	DV.TÍP.	SESGO	LÍM.INF	LÍM.SUP	NORM. SELEC.
Arroyo Trompetas	ArrTromp	6.698	5.541	0.907	-0.901	0.901	LN(Q+1)
Infiltración del acuífero Valle de Juárez	Inf Valle	2.91	1.495	0.033	-0.901	0.901	Q^0.5
Infiltración del acuífero Quitupan	Inf Quit	6.959	4.821	0.934	-0.901	0.901	Q^0.5
Río Quitupan	R Quit	4.169	1.654	0.126	-0.901	0.901	Q^0.5
Río Canolas	R Canl	55.255	13.847	0.385	-0.901	0.901	Q^0.5
Infiltración del acuífero Colomos	Inf Cols	14.554	5.112	0.35	-0.901	0.901	Q^0.5
Río Santa María y Agostadero	R Sta Ma y Agost	97.44	25.783	-0.107	-0.901	0.901	Q^0.5
Infiltración del Acuífero Cotija	Inf Cot	84.392	19.667	0.442	-0.901	0.901	Q^0.5
Río Jilotlán	R Jilot	108.095	30.275	0.416	-0.901	0.901	LN(Q+1)
Río Grande	R Grande	11.175	3.146	0.319	-0.901	0.901	Q^0.5
Río Itzicuarro	R Itzic	519.272	196.028	0.919	-0.901	0.901	LN(Q+1)
Infiltración del Acuífero Apatzingán	InfApat	344.24	132.721	0.181	-0.901	0.901	Q^0.5
Arroyo Cascalote	Arr Casc	7.536	3.715	0.502	-0.901	0.901	Q^0.5
Río Tecuilucan	R Tecuiluc	12.902	8.204	1.201	-0.901	0.901	Q^0.5
Río Rancho Viejo	R RchViej	0.711	0.276	0.58	-0.901	0.901	Q^0.5
Ríos Buenavista, Últimos y Zarapitiro	R Bue Ult Zrptro	107.311	70.932	0.774	-0.901	0.901	Q^0.5
Río Horcones	R Horc	5.118	3.252	1.258	-0.901	0.901	Q^0.5
Río Limón	R Limon	64.713	33.093	0.762	-0.901	0.901	LN(Q+1)
Río Tepalcatepec (A-1)	Rtepc A-1	10.667	4.49	0.86	-0.901	0.901	LN(Q+1)
Río Tepalcatepec (A-2)	RTepcA-2	6.175	5.135	0.998	-0.901	0.901	Q^0.5
Río Chila	R Chila	74.916	47.614	0.976	-0.901	0.901	LN(Q+1)
Río San Juan	R Sn Jn	80.843	57.241	0.788	-0.901	0.901	Q^0.5
Río Tepalcatepec (A-3)	RTepcA-3	10.067	8.418	1.18	-0.901	0.901	Q^0.5
Río Orejón	R Orejon	116.668	60.309	0.804	-0.901	0.901	Q^0.5
Río Acatlán y Cajones	Arr Acatl y Caj	31.563	24.764	0.811	-0.901	0.901	Q^0.5
Arroyo Salado	Arr Sal	1.347	0.915	1.056	-0.901	0.901	Q^0.5
Río Otates	R Otats	39.742	9.973	0.235	-0.901	0.901	Q^0.5
Río Lobo	R Lobo	15.776	4.923	1.138	-0.901	0.901	LN(Q+1)
Río Cotija	R Cot	11.923	10.971	2.183	-0.901	0.901	LN(Q+1)

Posteriormente se realiza el ajuste de series de Fourier y la tipificación, con la ayuda de la ec. 4.1. El modelo utilizado para la generación de las series estocásticas mensuales es el de desagregación espacial de Lane, debido a que está diseñado especialmente para problemas multivariados con un gran número de estaciones, es decir, casos en los cuales se tendría un alto número de parámetros si fuesen abordados sólo con una modelación multivariada tipo ARMA.

El modelo marca en su proceso la elección de un cierto grupo de estaciones principales, las cuales servirán de apoyo para la generación de las series de las mismas y de las secundarias, el criterio para la división es la correlación existente entre ellas y su ubicación geográfica y tipo de cuenca (cuenca de cabecera, cuenca media, cuenca baja), a las cuales de acuerdo a su menor o mayor valor se le fueron asignando estaciones secundarias (Tabla 25).

**Tabla 26.- Aportaciones principales y secundarias con su correlación**

CAB. BAJA	Correl. con ppal.
*R Otates	1
R. Limón	0.591
R Tecuiluc	0.509
R Sn Jn	0.523
R Orejón	0.439
R Horc	0.407
R Chila	0.588

CAB. ALTA	Correl. con ppal.
*R Sta Ma y	1
R Canl	0.727
R Jilot	0.698
R Quit	0.548
R Itzíc	0.471
ArrTromp	0.198

CENTRALES	Correl. con ppal.
*R Grande	1
RiRchViej	0.297
RTepc A-1	0.74
RTepcA-2	0.47
RTepcA-3	0.397
R Bue Ult	0.474

Ap. Acuíferos	Correl. con ppal.
*InfApat	1
Inf Cols	0.224
Inf Quit	0.127
Inf Cot	0.288
Inf Valle	0.178

DISPERSAS	Correl. con ppal.
*Arr Casc	1
R Lobo	0.103
Arr Acatly	0.35
Arr Sal Ig	0.21
R Cot	0.088

\*Estaciones principales de cada grupo

Se realizaron series sintéticas para los distintos escenarios, a partir de series históricas de 25 años de datos (1992-2017), la elección del año 1992 como año de partida en lugar del 1949 que es el año desde el que se tiene series de hidrometeorología completa, otra razón es porque a partir de 1992 la cuenca empieza a operar como lo hace en su estado actual (2017) ,que es el inicio de operaciones de la presa Apatzingán de la Constitución de 1814, la última en dar inicio en sus operaciones siendo esta, la más importante por las demandas y su efecto en el régimen natural del río. La generación de estas series sintéticas se realiza para periodos a futuros donde se requiera estimar la sequía operativa en el sistema de recursos hídricos.

## **7.5.- Gestión del riesgo de sequía (SIMRISK)**

Es muy común que los sistemas de recursos hídricos en la fase de explotación se gestionen sin al menos la conciencia de la probabilidad de ocurrencia de las sequías operativas, ni se tenga algún mecanismo explícito para enfrentarlas en el futuro, es decir, no se tiene un sistema de advertencia temprana.

El módulo de simulación que se presenta evalúa una serie de índices de evaluación de las situaciones de riesgo de fallo de un SRH, estos índices son útiles para transmitir una idea del estado del sistema y advertir al gestor de que existe una mayor o menor probabilidad de sequía.

Para este caso se dan de alta en SIMRISK las series creadas en MASHWIN y se realiza la modelación múltiple, obteniendo resultados con los cuales podremos definir índices que evaluarán la probabilidad de que el suministro quede reducido a un porcentaje del valor mensual de cada demanda comprendida en un intervalo definido por el usuario al que llamaremos “nivel”. El modelo calcula la probabilidad de que se produzca un fallo en cada nivel, para cada mes y año de la simulación. El segundo índice evalúa el porcentaje de suministro mensual que tiene un riesgo dado de que el suministro sea menor “probabilidad de excedencia de la intensidad de déficit. Los índices se mencionan a continuación.

Probabilidad de fallo por nivel de suministro.

Probabilidad de excedencia de la intensidad del déficit

Riesgo de fallo en criterios Utah.

Probabilidad estado de embalses

Probabilidad de no excedencia del almacenamiento de los embalses.

## **7.6 CALIBRACIÓN**

El proceso de calibración consiste en la identificación de un periodo histórico en el que se presenten sequías y otro en el que no se presenten, generar series sintéticas para tal periodo, modelar el riesgo de sequía operativa y establecer restricciones en tal periodo y compararlo con lo ocurrido realmente.

Las demandas Urbanas se han definido con un orden de prioridad 1 y las agrícolas con un orden de prioridad 2, lo que nos permitirá en SIMRISK definir distintos niveles de restricción para cada grupo de orden de prioridad en el caso de un posible fallo a esta. A continuación, se presentan distintos escenarios el primero (1999-2001) en el que se presenta una sequía, el segundo (2006-2008) un periodo en el que no se tienen problemas de sequía y ver el comportamiento del software y el tercero, el periodo futuro de interés (2017-2019) en el cual se desea realizar el cálculo de la sequía operativa para realizar la gestión correspondiente concerniente en este momento a las autoridades encargadas. Esto se puede observar principalmente en la figura 85 que muestra por medio de los índices de estado, la presencia de sequía en la cuenca.

### **Periodo 1999-2001**

En el periodo comprendido entre el año hidrológico iniciado en octubre de 1999 y terminado en septiembre del 2001, se puede observar un periodo de sequía coincidente en las 4 presas, motivo por el cual se ha definido tal periodo para la generación de series sintéticas, observar lo que ocurre en la gestión de la sequía, y obtener la reproducción del periodo.

**Tabla 27.- Resumen de déficit para cada demanda periodo 1999-2001**

Demanda	sin restricción	Urb.(%)	Agr.(%)	Urb.(%)	Agr.(%)	Urb.(%)	Agr.(%)	Urb.(%)	Agr.(%)
		10	20	20	40	30	50	50	80
<b>Demandas Urbanas</b>									
Apatzingán	✓	✓		✓		✓		✓	
Buenavista	✓	✓		✓		✓		✓	
Coalcomán	✓	✓		✓		✓		✓	
Cotija y Tocombo	✓	✓		✓		✓		✓	
Parácuaro	✓	✓		✓		✓		✓	
Quitupan	x	x		x		x		✓	
Santa María del Oro, Tamazula y Jilotlán	✓	✓		✓		✓		✓	
Tancítaro	✓	✓		✓		✓		✓	
Tangamandapio, Tingüindín, Los Reyes y Peribán	✓	✓		✓		✓		✓	
Tepalcatepec	✓	✓		✓		✓		✓	
Uruapan	✓	✓		✓		✓		✓	
Valle de Juárez y	✓	✓		✓		✓		✓	
<b>Demandas Agrícolas</b>									
DR 097 "LÁZARO CÁRDENAS"	Mod. 05	x	✓		✓		✓		✓
	Mod. 05-B	x	x		x		x		✓
	Mod. 06	x	x		x		x		x
	Mod.07	x	x		✓		✓		✓
	Mod. 08	x	x		x		✓		✓
	Mod. 09	x	x		x		x		✓
	Mod. 10	x	x		x		x		✓
	Mod. 11	x	✓		✓		✓		✓
	Mod. 11-2	x	x		x		x		✓
	Mod. 12	x	x		x		x		✓
DR 099 "La Magdalena"	x	x		x		x		x	
DR 013 "Quitupan"	x	x		x		x		✓	

Se puede observar en las demandas Urbanas la de Quitupan la sequía fue tan severa que le da un déficit hasta el grado en el que la restricción tiene que ser hasta de un 50% para dejar de producirse, que al tomar agua de una presa que se alimenta de una cuenca de cabecera en una sequía severa como la del 2006 se tendrá que restringir su consumo en un 50%, teniendo que tomar como medida alterna el extraer agua del acuífero.

Para el caso de las demandas agrícolas, se observa que en el estado ordinario de las demandas, todas tendrán déficit, con un 20% de restricción se observa que los módulos 05, 07 y 11 del DR 097 LC dejan de tener déficit, posteriormente al ir aumentando la restricción, el déficit va desapareciendo hasta llegar a la restricción del 80% donde ni el módulo 06 del DR 097 LC ni el Dr 099 dejan de tener déficit.

Periodo 2006-2008

En este segundo escenario se plantea observar lo ocurrido en un periodo donde no se observa sequía, para el cual se ha elegido el comprendido entre 2006 y 2008.

**Tabla 28.- Resumen de déficit para cada demanda periodo 2006-2008**

Demanda	sin restricción	Urb.(%)	Agr.(%)	Urb.(%)	Agr.(%)	Urb.(%)	Agr.(%)	Urb.(%)	Agr.(%)
		10	20	20	40	30	50	50	80
<b>Demandas Urbanas</b>									
Apatzingán	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Buenavista	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Coalcomán	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cotija y Tocumbo	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Parácuaro	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Quitupan	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Santa María del Oro, Tamazula y Jilotlán	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Tancitaro	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Tangamandapio, Tingüindín, Los Reyes y Peribán	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Tepalcatepec	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Uruapan	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Valle de Juárez y Mazamitla	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>Demandas Agrícolas</b>									
DR 097 "LÁZARO CÁRDENAS"	Mod. 05	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Mod. 05-B	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Mod. 06	x	x	x	x	x	x	x	x
	Mod.07	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Mod. 08	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Mod. 09	✓	x	x	x	x	x	x	✓
	Mod. 10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Mod. 11	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Mod. 11-2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Mod. 12	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR 099 "La Magdalena"	x	x	x	x	x	x	x	x	x
DR 013 "Quitupan"	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Se observa que en las demandas Urbanas no se presentan déficits y en las demandas agrícolas solamente se mantendrá un déficit en el módulo 06 DR 097 LC y DR 099.

### 7.7 Índice de riesgo de sequía operativa

De acuerdo, a Haro-Montegudo y otros (2017) han encontrado que como particularidad del modelo autorregresivo ARMA (1,1) después de 18 meses de series los valores tienden a la media y los resultados no son confiables, por lo tanto, se ha modelado cada año hidrológico, dando de entrada al modelo de gestión además de las series sintéticas de caudales, el nivel de cada uno de los embalses, así como los niveles de acuíferos, calculando la probabilidad de fallo para cada nivel de demanda.

w el valor de cada demanda entre el valor total de las demandas en toda la cuenca. Para obtener el Riesgo de sequía operativa(RSO) de la siguiente manera:

$$\text{Riesgo de sequía operativa} = \text{Prob. fallo} \times \text{Vulnerabilidad}$$

Cuando ya se ha obtenido el riesgo de sequía operativa, se busca estandarizar este valor y poder determinar diferentes categorías del riesgo, aplicando la fórmula siguiente, determinando un índice de riesgo de sequía operativa (IRSOE):

$$IRSOE = \frac{RSO - \overline{RSO}}{\sigma}$$

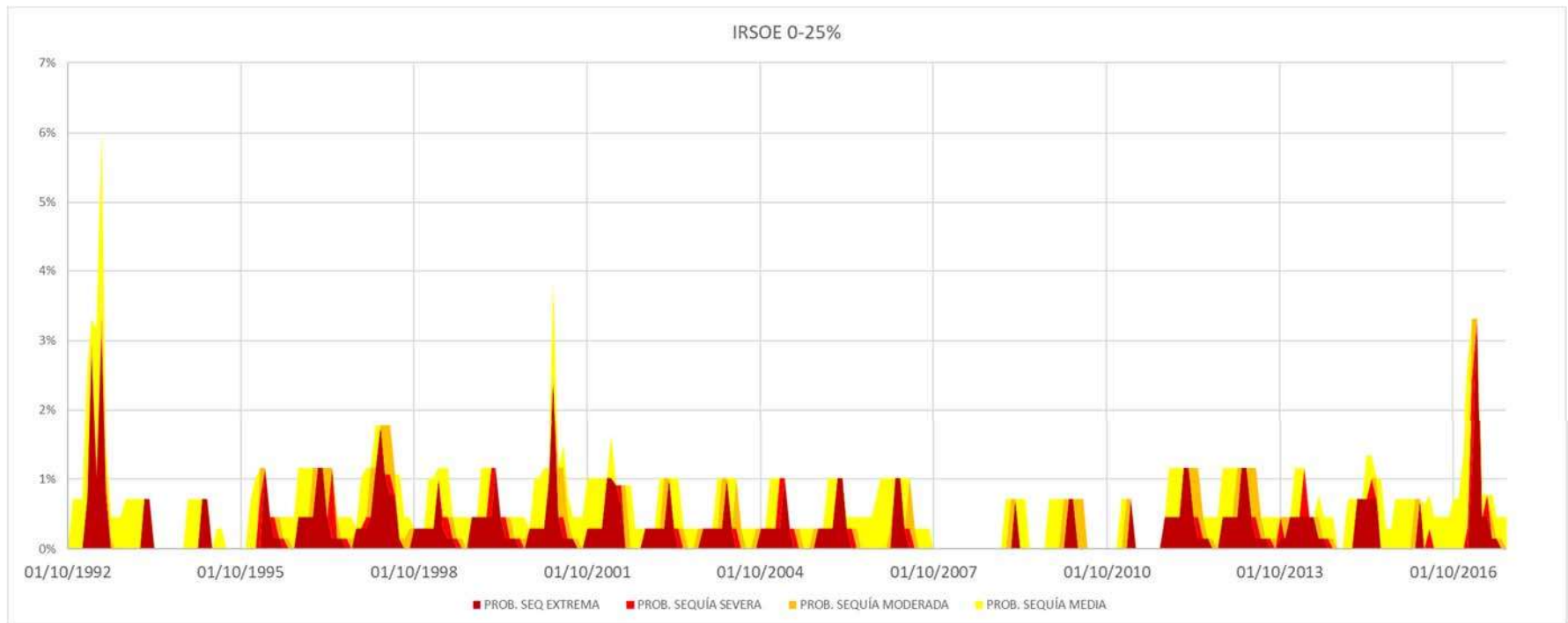
Las categorías se definieron de la siguiente manera:

**Tabla 29.- Categorías de Riesgo de Sequía Operativa**

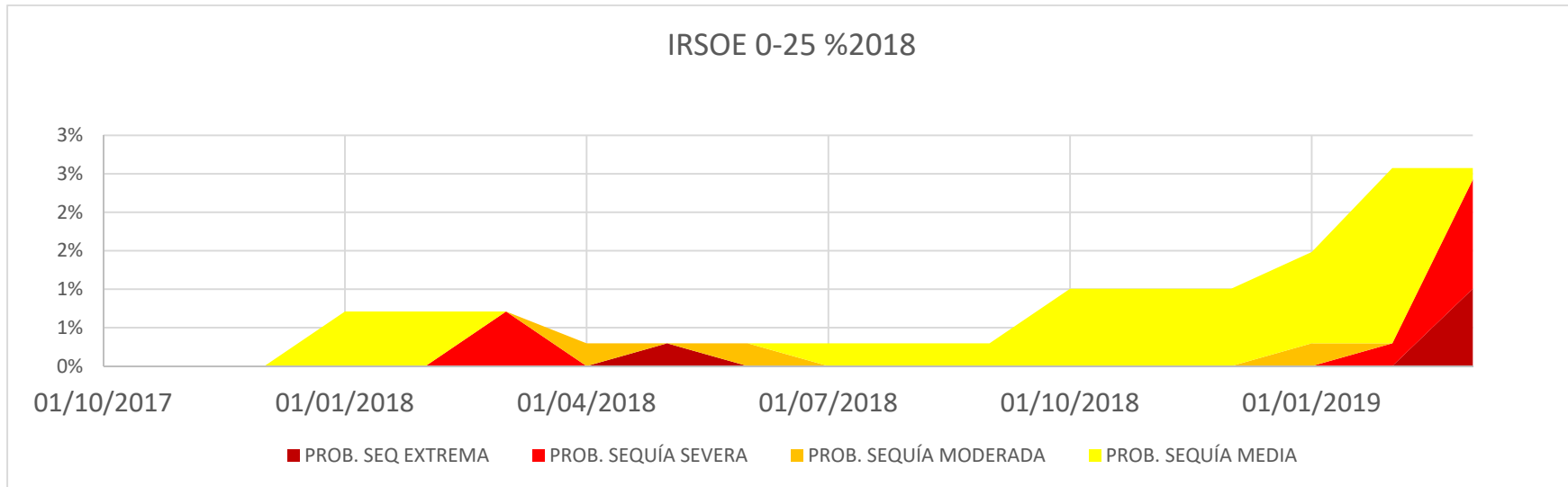
Valores IRSO	Categoría de sequía
0 to -0.99	Sequías medias
-1.00 to -1.49	Sequía moderada
-1.50 to -1.99	Sequía severa
≤-2.00	Sequía extrema

A continuación, se muestran los resultados de los índices para cada porcentaje de demanda. Las gráficas corresponden al porcentaje de área afectada con cada categoría de sequía con respecto al área total de la cuenca. También se muestran los resultados de estos porcentajes para proyecciones a futuro con condiciones reales como con condiciones de sequía (mínimo gasto registrado histórico para cada aportación en el mes de septiembre necesario para la creación de las series sintéticas de caudales y mínimo nivel en los embalses para el mes de octubre).

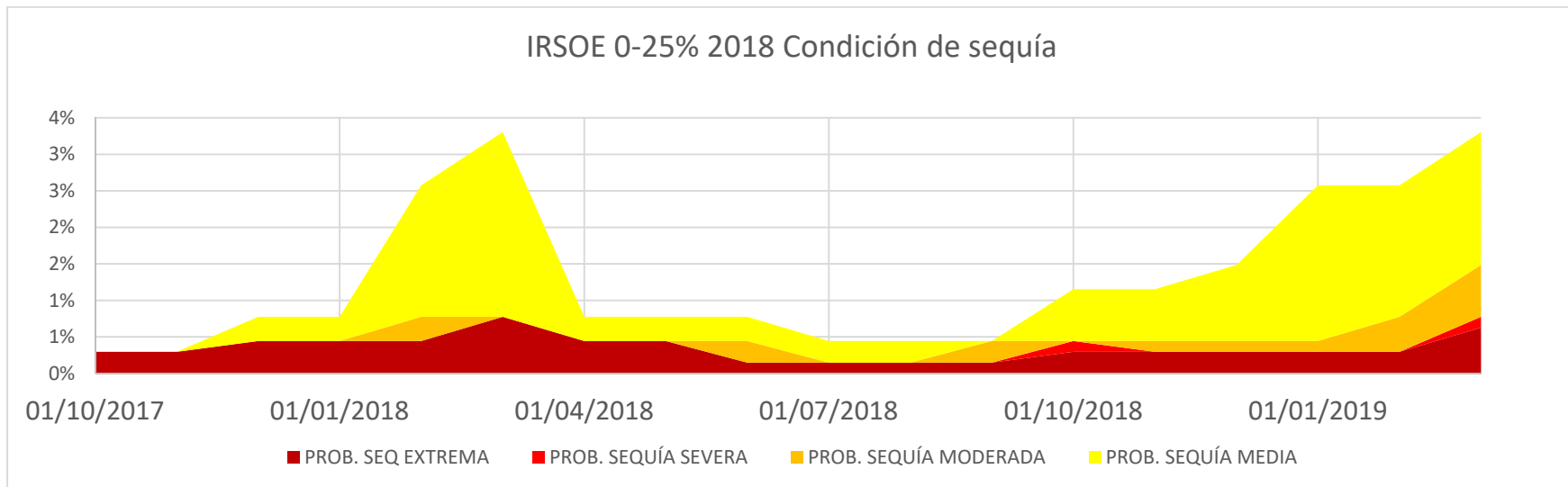
### DEMANDA DEL 0-25%



**Figura 69.-** Porcentaje de área afectada con IRSOE para una demanda del 0-25%

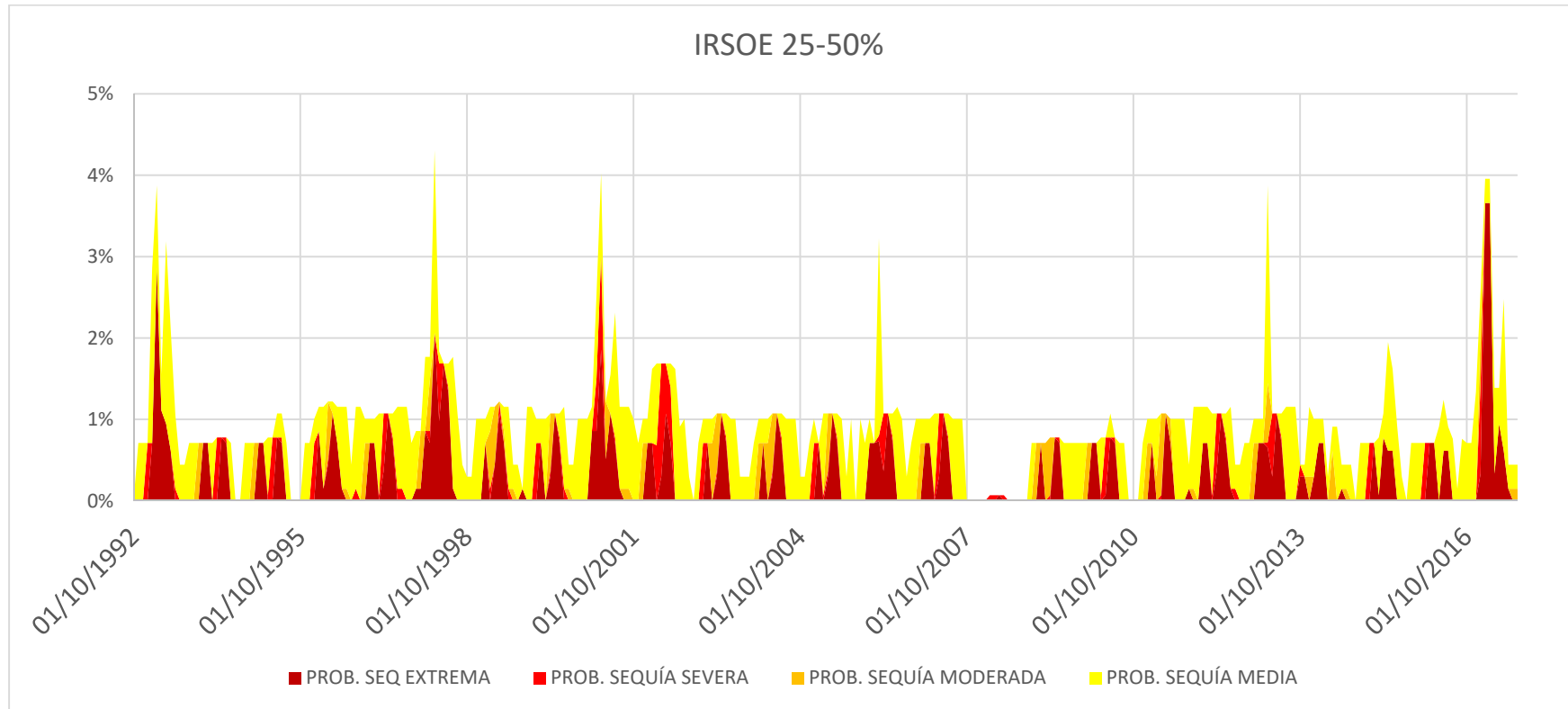


**Figura 70.-** Porcentaje de área afectada para proyección años 10/2017-03/2019. Demanda 0-25%

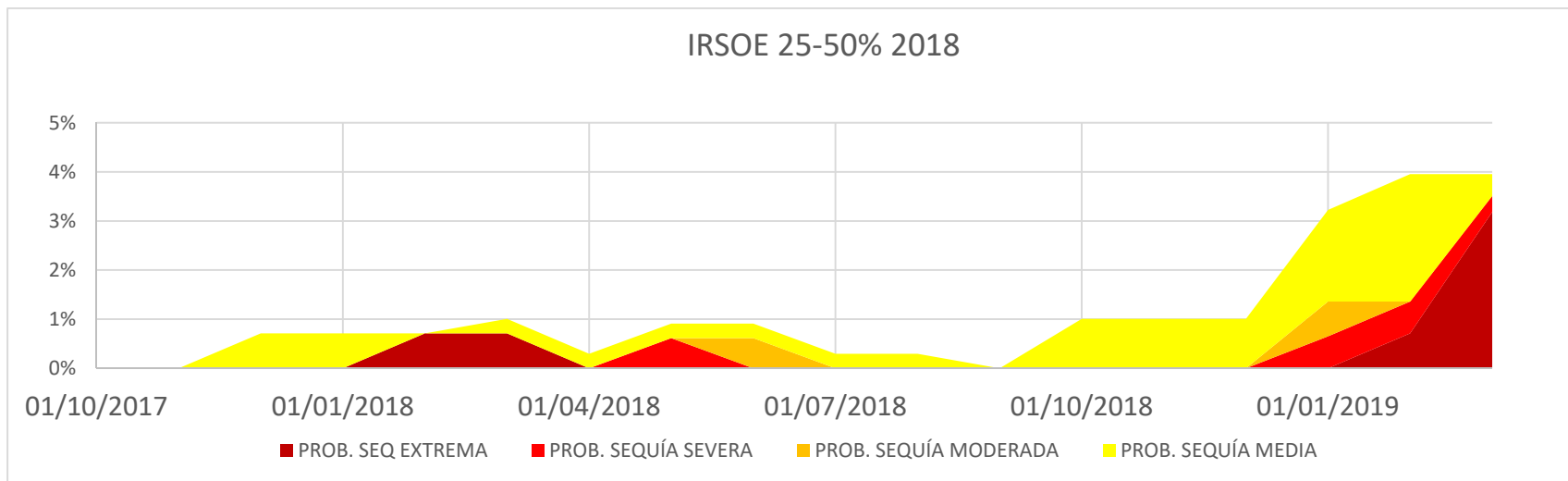


**Figura 71.-** Porcentaje de área afectada para proyección 10/2017-03/2019 bajo condiciones de sequía. Demanda 0-25%

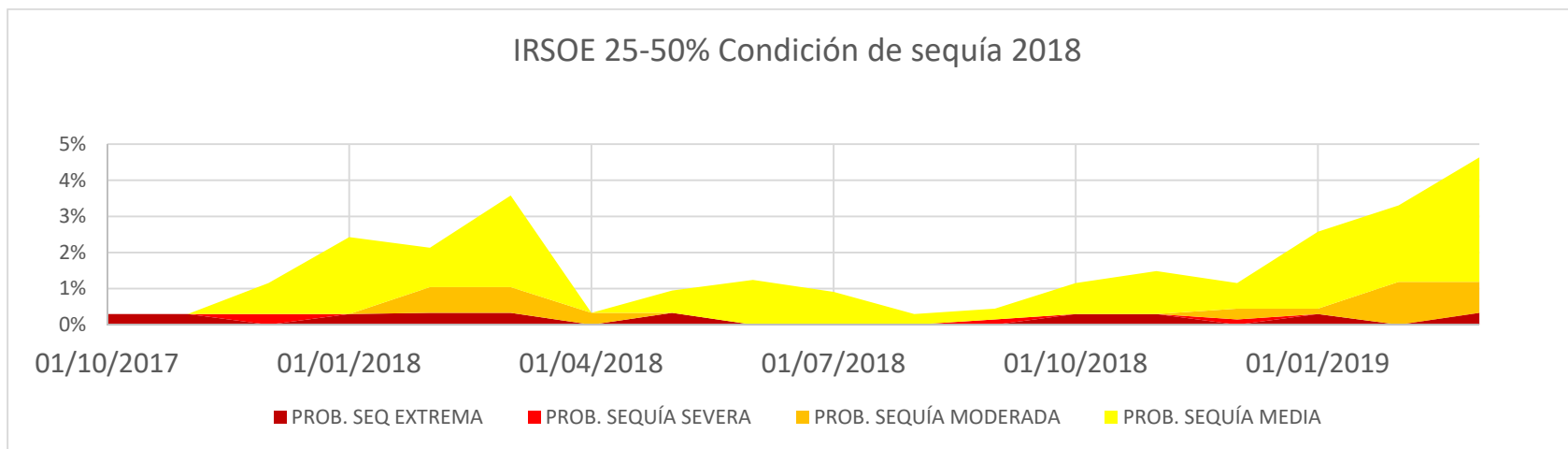
DEMANDA DEL 25-50%



**Figura 72.-** Porcentaje de área afectada con IRSOE para una demanda del 25-50%

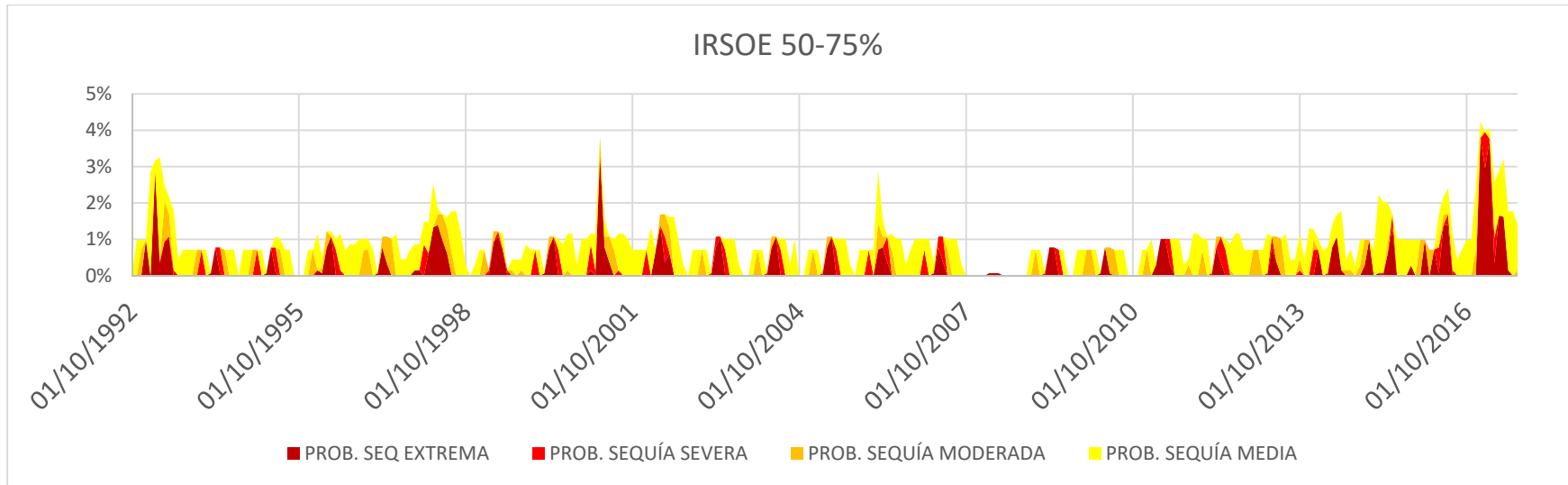


**Figura 73.-** Porcentaje de área afectada para proyección año 10/2017- 03/2019. Demanda 25-50%



**Figura 74.-** Porcentaje de área afectada para proyección año 10/2017-03-2019 bajo condiciones de sequía. Demanda 25-50%

## Demanda 50-75%



**Figura 75.-** Porcentaje de área afectada con IRSOE para una demanda del 50-75%

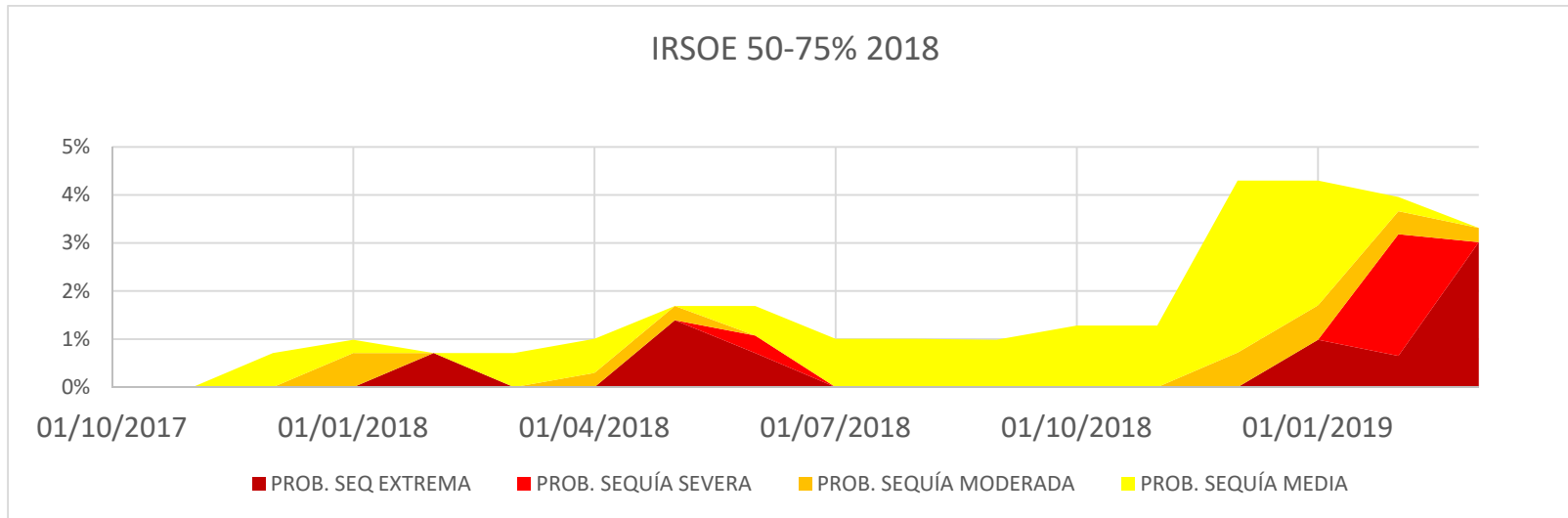


Figura 76.- Porcentaje de área afectada para proyección año 10/2017- 03/2019. Demanda 50-75%

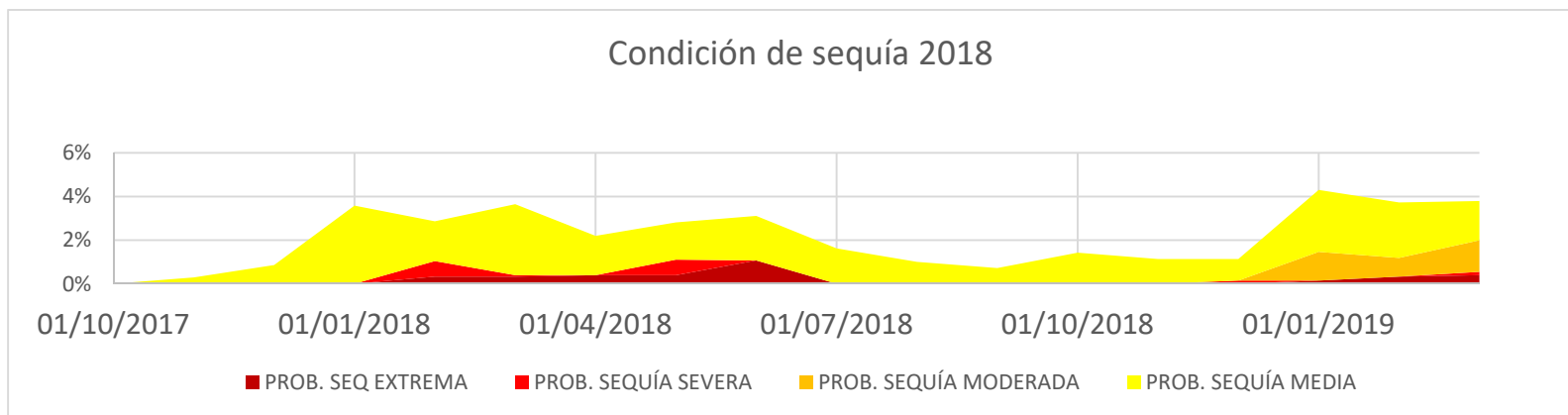
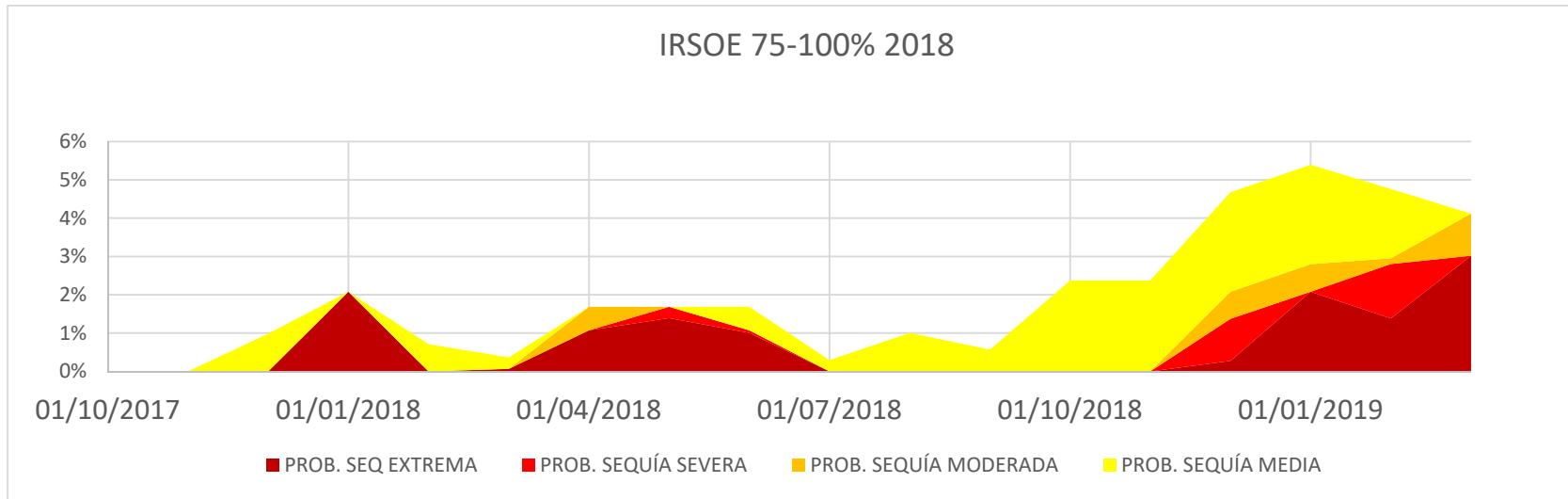


Figura 77.- Porcentaje de área afectada para proyección año 10-2017-03/2019 bajo condiciones de sequía. Demanda 50-75%

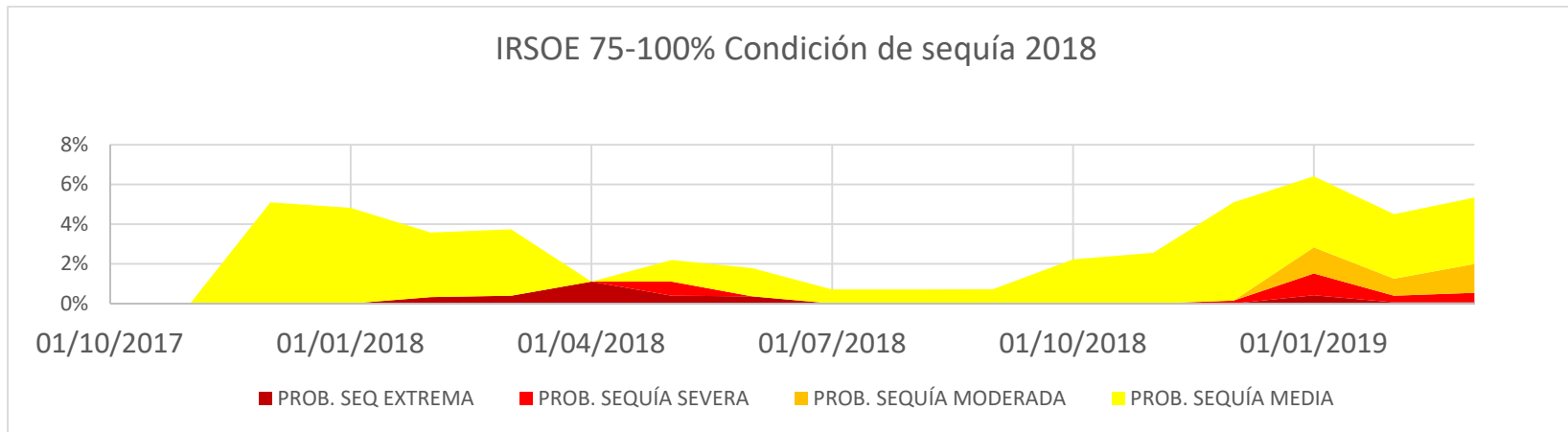
## Demanda 75-100%



**Figura 78.-** Porcentaje de área afectada IRSOE para una demanda del 75-100%



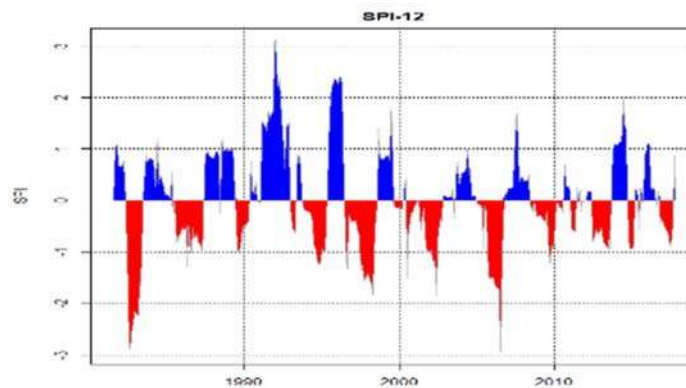
**Figura 79 .-** Porcentaje de área afectada para proyección año 10/2017-03/2019. Demanda 75-100%



**Figura 80.-** Porcentaje de área afectada para proyección año 10/2017- 03-2019 bajo condiciones de sequía. Demanda 75-100%

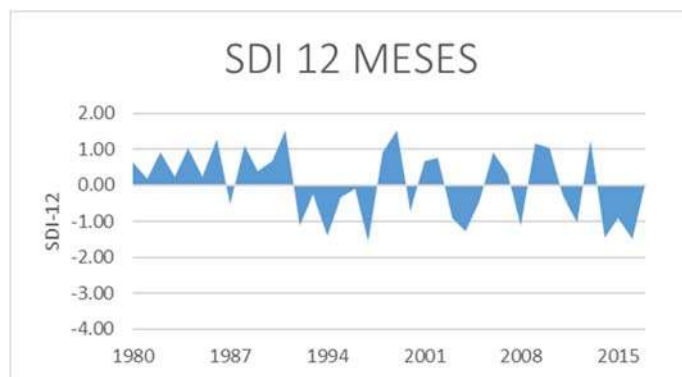
## 7.8.- Caracterización de sequías hidrológicas y meteorológicas

Se muestran los resultados para el SPI de la estación climatológica 16007 de Apatzingán, Michoacán, muy cercano a la ubicación del centroide de la cuenca, además de ser la zona donde se encuentra la mayor concentración de la población y donde se encuentra la mayor cantidad de terrenos de cultivo, se muestra que hubo un episodio de sequía extrema a principios de la década de 1980. De ahí en adelante se estimaron sequías moderadas en la década de 1990 y de 2010 a la fecha, se observa otro periodo de sequías medias recurrentes año a año. (Figura 4).



**Figura 81.-** SPI -12 estación climatológica 16007-Apatzingán

Por otro lado, para el SDI se muestran los resultados de la estación hidrométrica 18494 Los Panches que se encuentra en el punto de salida de la cuenca afectando la mayor concentración de la población y de los terrenos de cultivo, los resultados representan el cálculo para el periodo entre octubre de 1980 y septiembre de 2017 donde se puede observar que de 1980 a 1992 prácticamente no existieron sequías meteorológicas, no así, en el periodo de 1992 a 1996 se observa un periodo de sequías meteorológicas moderadas, en el 2006 y 2010 un episodio de sequía media y de 2015 a 2017 sequía moderada consecutivo sin recuperación (Figura 5).

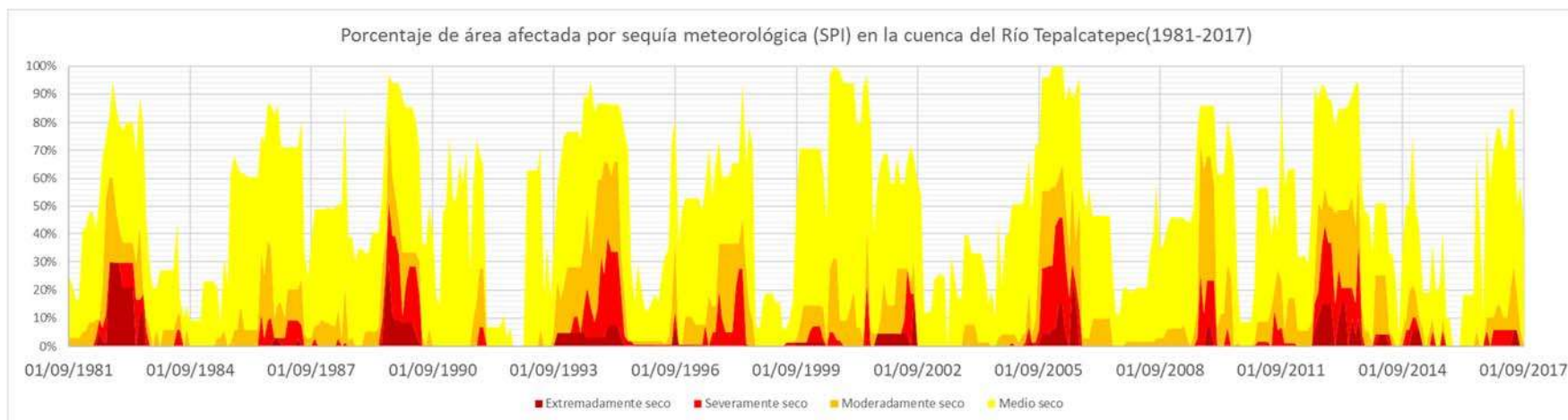


**Figura 82.-** SDI-12 Estación Hidrométrica 18094 Los Panches.

En el cálculo del SPI se alcanza a observar la recuperación existente a finales del año 2017 debido a un incremento en la precipitación, en el SDI ya no se alcanza a notar dicha recuperación, con esto y con la observación de distintos periodos se resalta que no existe firme relación temporal entre la ocurrencia de sequías meteorológicas e hidrológicas porque como lo explica Huang (2017) son independientes ya que existe una gran cantidad de factores que influyen en esto, además de la mano del hombre.

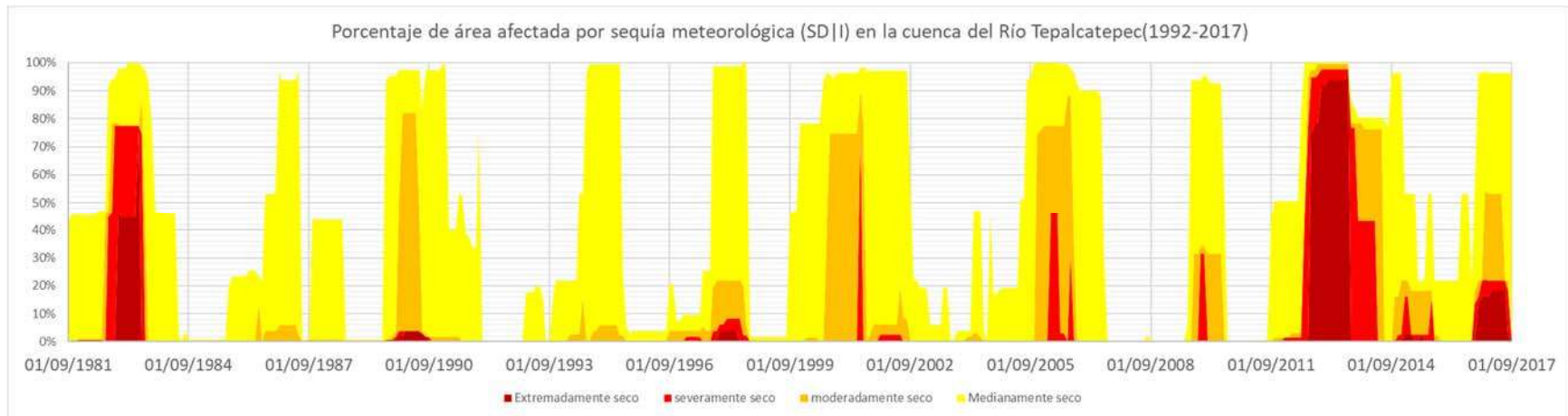
Finalmente, se muestran los resultados de la espacialización de datos logrando representar el estado de la cuenca tanto temporalmente como espacialmente. En la figura 6 tenemos el gráfico que representa los resultados del porcentaje de área afectada por cada rango con respecto al tiempo.

Para el caso de la sequía meteorológica, se puede observar que la sequía media se repite periódicamente, que para otros autores se refiera a sequía normal en donde los efectos se pueden considerar prácticamente nulos, la sequía severa y extrema se puede observar que se manifiesta en algunos periodos, principalmente en los años 1994 y 1995 con hasta un 35% del área total de la cuenca afectada, los años 2005 y 2006 llegando hasta a un 40% de la cuenca y los años 2012 y 2013, donde se tiene un 40% de la cuenca afectado, el haber adoptado el SPI-12 nos ayuda a no tener periodos pequeños con sequía, si no periodos más largos hacia tendencias anuales



**Figura 83.-** Porcentaje de área afectada con diferente intensidad de sequía meteorológica

Para la sequía hidrológica se puede observar (Figura 83) que periódicamente abarca casi un 100% de la cuenca y encontramos que la sequía severa y extrema principalmente se ubican en los años 1982-1983 coincidente con el periodo en la gráfica del SPI observando que con un 30% de afectación en sequía meteorológica, se puede llegar a afectar hasta un 70% de la cuenca, en los años posteriores, se tienen otros efectos que aunque pueden llegar a afectar un área considerable en meteorológicas, apenas llegan a ser moderadas o severas en hidrológicas (1989-1990, 1997-1998, 2001-2002) y en los últimos 5 años 2012-2017, se observa una afectación en sequías hidrológicas de severa a extrema en gran parte de la cuenca, ya no observada así en sequías meteorológicas, esto puede ser debido principalmente al creciente auge de la agricultura en la zona de los últimos años, extrayendo grandes cantidades de agua superficiales generando estos efectos. Esta comparación de sequías meteorológicas e hidrológicas se puede observar en la figura 85.



**Figura 84.-** Porcentaje de área afectada con diferente intensidad de sequía hidrológica

Nuestros resultados pueden ser comparados con el Monitor de Sequía en México (MSM, 2002) que muestra unas tendencias similares a nuestros resultados, teniendo el periodo del 2005-2005 y el 2012-2013, representado con valores altos en hasta un 50% del país, lo cual demuestra que cuando el MSM detectó sequías en gran parte del país, estas también se vieron representadas en la cuenca del Río Tepalcatepec.



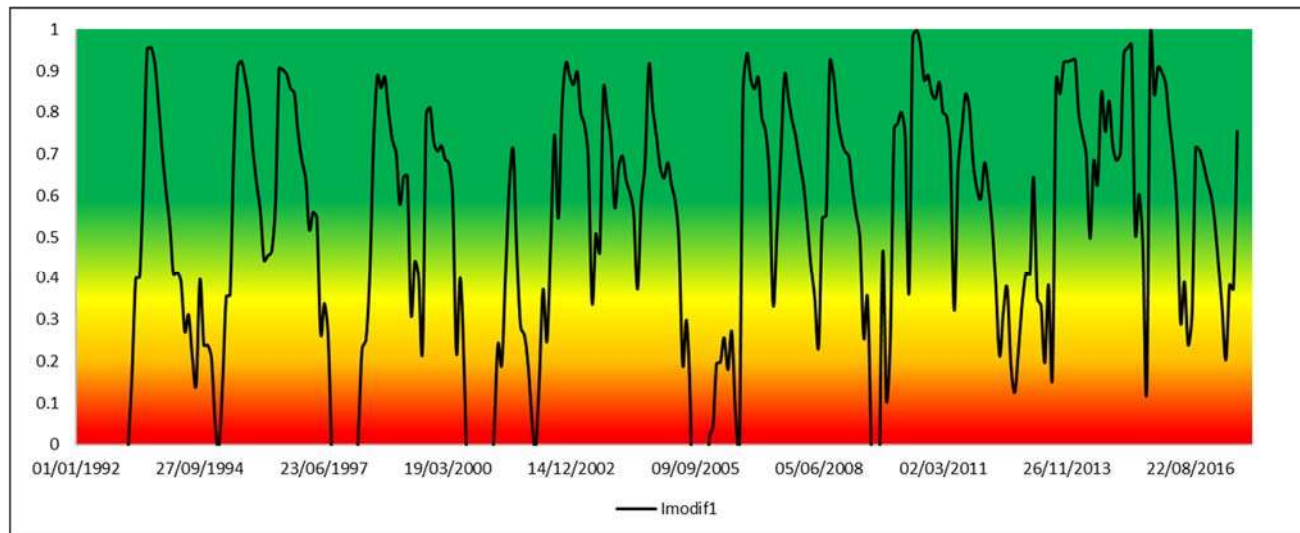
**Figura 85.-** Comparativa de porcentaje de área afectada por sequía SDI vs SPI

## 7.9 .- Indicador de sequías usado actualmente en Europa

Se ha obtenido el SI (mencionado en el capítulo 4) para nuestra cuenca que es el indicador se usa actualmente en Europa con el objetivo de obtener el estado de la cuenca y su afectación para servir como medio de comparación con el RSOI propuesto en este trabajo así como el SPI y SDI calculados anteriormente. Para cada variable seleccionada el valor del IE se calcula de la siguiente manera: Donde es el  $V_i$  valor mensual de cada variable,  $V_{av}$  es la media mensual de la serie histórica considerada,  $V_{min}$  y  $V_{max}$  son los máximos y mínimos valores mensuales en la serie considerados respectivamente. Las variables seleccionadas para este caso son los volúmenes de las presas, dando a cada presa un peso de acuerdo a su volumen de almacenamiento, dando como resultado el siguiente gráfico:

$$\text{Si } V_i \geq V_{av} \rightarrow SI = \frac{1}{2} * \left( 1 + \frac{V_i - V_{av}}{V_{max} - V_{av}} \right)$$

$$\text{Si } V_i < V_{av} \rightarrow SI = \frac{1}{2} \left( \frac{V_i - V_{min}}{V_{av} - V_{min}} \right)$$



**Figura 86.-** Índices de estado de la CHRT

De acuerdo al gráfico se observan sequías extremas al principio del año hidrológico de 1994 a mediados del año 2000 y del año 2002, posteriormente una sequía severa prolongada en el año 2005 con episodios de extrema, finalmente en los años 2012-2013 se observa un largo episodio de sequías severas donde mas que su intensidad el problema fue su duración.

### **7.10 .-Discusión de resultados**

Un 7% de la superficie de la cuenca está cubierta por zonas de riego, que son las que pueden llegar a sufrir un déficit en la demanda y que tienen una mayor probabilidad de fallo ya que a diferencia de la demanda urbana que posee una menor prioridad para el consumo de agua, es por esto que, en las gráficas del área afectada por un riesgo de sequía operativo el valor máximo que se puede llegar a alcanzar es un 7%

De un 0 a un 25% y de un 25 a 50% de la demanda se puede observar que un 1% de la cuenca sufre sequías severas principalmente año a año en la época de estiaje, es decir que, este 25% tiene el riesgo de no poseer un volumen adecuado para satisfacerse, observando unos picos altos en 1993, 2002 y 2017 y una prolongación en la duración en los años 2012 a 2014. Los picos altos observados en este porcentaje de la demanda coinciden con los observados en la gráfica de sequías hidrológicas, y en la de índices de estado (para este caso se observa la gráfica en la zona roja) pero no en la de sequías meteorológicas. La proyección de la sequía se observa que a condiciones ordinarias un 1% de la superficie sufrirá sequías medias intensificándose al final del periodo determinado prácticamente en el año 2019, observando incluso episodios de sequía severa.

En cambio, en un 50 a un 75% de la demanda, se observa que los periodos de sequía son más cortos con respecto a las otras gráficas, es decir se intensifican en el mes más crítico y no se vuelven a repetir, esto quiere decir que los distritos de riego tienen el compromiso de dar un volumen de agua y que año a año no pueden satisfacer esta demanda para ciertos meses, a excepción de los años 2008 y 2015.

Del 75 al 100% de la demanda se observa que el riesgo de sequía operativa es alto al inicio de la operación del distrito de riego 097 Lázaro Cárdenas, ya que no se cumplen con las demandas al estar probando la manera de distribuir el recurso hídrico. Al final del periodo, (época más reciente) se puede observar que a partir de la sequía meteorológica e hidrológica registrada a partir de los años 2012 y 2013, además de que se tiene registro de que una nueva batimetría confirma lo que se temía, la presa Los Olivos ha disminuido su volumen útil en un 60%, es por estos motivos que los gestores de agua comienzan a generar crisis al cambiar la gestión de la presa, entregar menor cantidad de agua de la que entregaban anualmente, teniendo sequías operativas intensas, que afectan hasta hasta la demanda del 75-100%.

Las figuras 70, 71, 73, 74, 76, 77, 79 y 80 muestran las proyecciones a futuro cada porcentaje de demanda presenta la gráfica de resultados tanto para condiciones normales, como para condiciones de sequía (nivel de presea y gasto más bajo presentado históricamente al inicio del año hidrológico), en el caso de la demanda del 0-25%, 25-50% y 50-75% se observan comportamientos muy parecidos donde las condiciones de sequía presentan el doble de zona afectada con riesgo de sequía operativa medio y al final un incremento de riesgo de sequía severa, en el caso del 75% de la demanda en condiciones ordinarias se tienen sequías extremas en periodos prolongados y sequías medias en hasta un 2% de la superficie de la cuenca con condiciones de sequía.

En la parte este de la cuenca en los municipios de Tancítaro y Uruapan principalmente se ha observado la creciente construcción de ollas de almacenamiento lo que puede afectar el escurrimiento a régimen natural y puede ser en parte responsable de las sequías hidrológicas registradas en periodo del 2012 a la fecha. (Figura 84).

## **8.- CONCLUSIONES**

Se logró generar el modelo de gestión hídrica de la CHRT gracias a la generación de los diferentes modelos superficial, subterráneo, de gestión, estadístico y de gestión de sequías con el uso de los datos, usos y recursos obtenidos a través de las diferentes plataformas y con el apoyo las instituciones correspondientes, con lo cual se evaluó la sequía operativa en sus diferentes categorías de demanda pudiendo obtener finalmente medidas y propuestas para la planificación de los recursos hídricos en la cuenca del río Tepalcatepec, de las cuales se irán mencionando a continuación

Se reconoce la labor de las instituciones encargadas para la recopilación de datos climatológicos e hidrométricos, no obstante, para la elaboración de estos modelos se requiere de una mayor calidad y cantidad de datos para el completado y la labor de validación y calibración de los diferentes modelos desarrollados, pese a esto se ha desarrollado e implementado una metodología que ha permitido a pesar de las adversidades, obtener modelos con buenos resultados. Se propone adicionalmente apoyar en la mejora la red de toma de datos hidrológicos y climáticos a través de sistemas en tiempo real ya muy utilizados dentro y fuera del país.

Esta herramienta nos será muy útil para entender históricamente la sequía operativa existente en la cuenca del río Tepalcatepec, así como con las series sintéticas generadas podremos determinar a futuro las ocurrencias y los efectos para cada nivel de la demanda. Para poder dar a los organismos de gobierno una herramienta útil con la cual se sepa exactamente cuánto se debe o no se debe restringir cada demanda para no generar crisis ni para entregar un mayor volumen de agua del que se dispone.

Los Distritos de Riego correspondientes al 013 de Quitupan y al 099 de “La Magdalena” son muy vulnerables ante el efecto de sequías meteorológicas, es decir, si en un año no llueve sus probabilidades de fallo son altas en cualquier nivel de la demanda pero principalmente en los más bajos (0-25%,25-50%).

Para el Distrito de Riego 097 los módulos 8, 9, 10, 11, 12 son los menos vulnerables de generar sequías operativas ante la existencia de sequías meteorológicas o hidrológicas debido a que se encuentran cercanos a la Presa de Constitución de Apatzingán de 1814 y con una buena operación de esta, no sufrirán crisis, los distritos de riego 5, 5b, 6 y 7 más que vulnerables a la sequía operativa lo son a la meteorológica e hidrológica ya que el cumplimiento de sus dotaciones se deben ausencia o presencia de gastos dentro de las corrientes designadas para suministrarles agua y en su gran mayoría presentan episodios de riesgo de sequía operativa alta. Se propone en las zonas mencionadas con mayor vulnerabilidad en la sequía operativa participar en la gestión de demandas haciendo uso de esta herramienta anualmente es decir dependiendo el estado de la cuenca al final del año hidrológico hacer uso del modelo para realizar la distribución del recurso hídrico.

Es lógico que la falta de infraestructura en los distritos de riego de la cuenca del río Tepalcatepec es alta y el panorama se muestra nublado debido a que las presas Vicente Villa Señor, San Juanico y Los Olivos están llegando al fin de su vida útil con casi 50 años de haber entrado en operación. La Presa de Chilatan por su parte, la cual tiene a su cargo suministrar recursos hídricos a gran parte del Distrito de Riego 097 "Lázaro Cárdenas" con casi 120 000 hectáreas, ha recibido una gran labor de modernización en sus canales de distribución de riego, recibiendo recientemente la construcción de sifones de hasta 1.2 km de longitud y 20 metros de diámetro siendo beneficiados los módulos 9, 10 11 y 12, y la tendencia es modernizar el distrito de riego por completo, no obstante la presa ya llegó a la mitad de su vida útil y más que una modernización, se debe empezar a pensar en medidas alternas como la construcción de una nueva presa o una serie de presas que dé seguimiento al desarrollo agrícola de esta zona o por otro lado mejorar la eficiencia en las conducciones y sistemas de riego, ya que se ha reportado que la eficiencia en las conducciones y en el riego está aproximadamente en un 40%, esto significa que si se llega a una tecnificación en las zonas más vulnerables estaríamos

prácticamente en la última categoría (75-100%) y no se presentarían sequías operativas.

Otro caso importante que se ha logrado identificar es la sequía hidrológica tan severa que se presenta en los años 2012-2014 que se ve representada en la sequía meteorológica pero no en tanto grado, lo que denota los posibles cambios de uso de suelo en la parte alta de la cuenca en los municipios principalmente de Tancítaro y Uruapan para el cultivo de aguacate, así como la construcción de ollas de almacenamiento que han empezado a retener el flujo de los ríos y que ha generado dicha sequía, se propone realizar una revisión y un censo tanto del uso de suelo como de la cantidad de agua almacenada en dichas ollas y tomar medidas jurídicas en caso de que se este realizando de manera desmedida.

Se espera que este trabajo sea un parteaguas ante la planificación futura de la cuenca del Río Tepalcatepec y de las cuencas en México con la cual se podrán afrontar cualquier tipo de sequías que se presente, que operativamente no se vea afectado evitando la generación de crisis hídrica y servir de medio para una futura planificación integral de la cuenca a corto plazo considerando las sequías existentes en la cuenca.

Además, se espera influir y tener como líneas futuras de investigación en el efecto del cambio climático, así como influir directamente en la mejora de la red de toma de datos, además de la posibilidad de la aplicación de la metodología en otras cuencas de México.

## 9.- BIBLIOGRAFÍA

- Alemu, E. T., Palmer, R. N., Polebitski, A., & Meaker, B. (2011). Decision Support System for Optimizing Reservoir Operations Using Ensemble Streamflow Predictions. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(1), 72–82.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000088](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000088)
- Andreau, J., Capilla, J., & Sanchiz, E. (1991). AQUATOOL: A Computer-Assisted Support System for Water Resources Research Management Including Conjunctive Use. In *Nato ASI SERIES* (pp. 333–335). Valencia, España.
- Andreau, J., & Sahuquillo, A. (1987). Efficient Aquifer Simulation in Complex Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 13(1).  
[https://doi.org/doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1987\)113:1\(110\)](https://doi.org/doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1987)113:1(110))
- Andreau, J., Solera, A., Capilla, J., & Ferrer, P. (2011). *Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, incluyendo Utilización Conjunta*. (U. P. de Valencia, Ed.). Valencia, España.
- Andreu, J., Capilla, J., & Sanchís, E. (1996). AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, 177(3–4), 269–291. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02963-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02963-X)
- Andreu, J., Solera, A. A., Capilla, S. J., & Sánchez Quispe, R. S. T. (2001). Modelo SIMRISK de Simulación múltiple de la Gestión de Recursos Hídricos con estimación del riesgo, incluyendo Utilización Conjunta. Manual del Usuario Versión 2.4. Retrieved from <https://www.upv.es/aquatool/files/manuales/ManSimriskEsp.pdf>
- Avilés, A., & Solera, A. (2012). Estimación del riesgo de fallo en el suministro de agua como ayuda a la planificación y gestión de recursos hídricos. *Maskana*, 77–86. Retrieved from [http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5419/1/MASKANA 3206.pdf](http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5419/1/MASKANA%203206.pdf)
- Bejarano, M. D., Marchamalo, M., Jalón, D. G. de, & Tánago, M. G. del. (2010). Flow regime patterns and their controlling factors in the Ebro basin (Spain). *Journal of Hydrology*, 385(1–4), 323–335. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.001>

- Belmar, O., Velasco, J., & Martinez-Capel, F. (2011). Hydrological Classification of Natural Flow Regimes to Support Environmental Flow Assessments in Intensively Regulated Mediterranean Rivers, Segura River Basin (Spain). *Environmental Management*, 47(5), 992–1004. <https://doi.org/10.1007/s00267-011-9661-0>
- Bren, L. J., & Lane, P. N. J. (2014). Optimal development of calibration equations for paired catchment projects. *Journal of Hydrology*, 519(PA), 720–731. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.07.059>
- Campos, D. F. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. San Luis Potosí, S.L.P., México.
- Chavez-Jimenez, A., Lama, B., Garrote, L., Martin-Carrasco, F., Sordo-Ward, A., & Mediero, L. (2013). Characterisation of the Sensitivity of Water Resources Systems to Climate Change. *Water Resources Management*, 27(12), 4237–4258. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0404-2>
- CICESE. (2017). Base de Datos del CLICOM. Retrieved August 7, 2017, from <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>
- CONAGUA. (2009). Actualización de la disponibilidad media anual de aguas subterráneas. ACUÍFERO (1622) COTIJA, (1003).
- CONAGUA. (2011a). *Determinación de la disponibilidad media anual de agua subterránea del acuífero 1438 Colomos*.
- CONAGUA. (2011b). *Determinación de la disponibilidad media anual de agua subterránea del acuífero 1439 Quitipan del Estado de Jalisco*.
- CONAGUA. (2014). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua, en el acuífero Valle de Juárez (1440), Estado de Jalisco*.
- Contreras, C. S. (2005). Las sequías en México durante el siglo XIX. *Investigaciones Geográficas*, (56), 118–133. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n56/n56a8.pdf>
- Dagbegnon, S. (2017). Bridging drought and climate aridity. *Journal of Arid Environments*, 144, 170–180. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2017.05.002>
- Di Matteo, L., Dragoni, W., Maccari, D., & Piacentini, S. M. (2017). Climate change, water supply and environmental problems of headwaters: The paradigmatic case of the Tiber, Savio and Marecchia rivers (Central Italy). *Science of The Total Environment*, 598, 733–748. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.04.153>

- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 28(4), 1015–1031. <https://doi.org/10.1029/91WR02985>
- Escalante, C. A., & Reyes, L. (2002). *Técnicas Estadísticas en Hidrología* (Primera Ed). Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ferrer, J. (2007). PLAN ESPECIAL DE ACTUACIÓN EN SITUACIÓN DE ALERTA Y EVENTUAL SEQUIA. Retrieved from <https://www.chj.es/es-es/medioambiente/gestionsequia/Documents/Plan Especial Alerta y Eventual Sequia/ISA PES 15-12-2006 El PES en la CHJ.pdf>
- García-Barrón, L., Camarillo, J. M., Morales, J., & Sousa, A. (2015). Temporal analysis (1940-2010) of rainfall aggressiveness in the Iberian Peninsula basins. *Journal of Hydrology*, 525, 747–759. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.036>
- González-Zeas, D., Garrote, L., Iglesias, A., & Sordo-Ward, A. (2012). Improving runoff estimates from regional climate models: a performance analysis in Spain. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(6), 1709–1723. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1709-2012>
- Haro-Monteagudo, D., Solera, A., & Andreu, J. (2017). Drought early warning based on optimal risk forecasts in regulated river systems: Application to the Jucar River Basin (Spain). *Journal of Hydrology*, 544, 36–45. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2016.11.022>
- Haro, D., Solera, A., Paredes, J., & Andreu, J. (2014). Methodology for drought risk assessment in within-year regulated reservoir systems. Application to the Orbigo River system (Spain). *Water Resources Management*, 28(11), 3801–3814. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0710-3>
- Heim, R. R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2002\)083<1149:AROTDI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2002)083<1149:AROTDI>2.3.CO;2)
- Huang, Y., Li, Y. P., Chen, X., Bao, A. M., & Zhou, M. (2010). Simulation-based optimization method for water resources management in Tarim River Basin, China. *Procedia Environmental Sciences*, 2, 1451–1460. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.158>

- Jeevananda Reddy, S. (1995). Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(1–2), 121–125. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02239-T](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02239-T)
- Jódar, J., Cabrera, J. A., Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., González-Ramón, A., Lambán, L. J., ... Custodio, E. (2017). Groundwater discharge in high-mountain watersheds: A valuable resource for downstream semi-arid zones. The case of the Bérchules River in Sierra Nevada (Southern Spain). *Science of the Total Environment*, 593–594, 760–772. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.190>
- Kim, Y., Kim, T.-H., & Ergün, T. (2015). The instability of the Pearson correlation coefficient in the presence of coincidental outliers. *Finance Research Letters*, 13, 243–257. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2014.12.005>
- Lerma, N., Paredes, J., Andreau, J., & Solera, A. (2015). Comparativa de algoritmos para la optimización de un sistema de recursos hídricos. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, VI, 79–92. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v6n3/v6n3a6.pdf>
- Liao, H., Xu, Z., & Zeng, X.-J. (2015). Novel correlation coefficients between hesitant fuzzy sets and their application in decision making. *Knowledge-Based Systems*, 82, 115–127. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.02.020>
- Linsley, R. K. (1958). *Hydrology for engineers* (Vol. 72).
- Lund, J. R., & Guzman, J. (1999). Derived Operating Rules for Reservoirs in Series or in Parallel. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(3), 143–153. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1999\)125:3\(143\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1999)125:3(143))
- Marizza, M. S. (2003). *Integración de la información espacio temporal para la restitución de las series de aportaciones al régimen natural utilizando sistemas de información geográfica*. Valencia, España: E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM). Retrieved from <http://oa.upm.es/1227/>
- Mckee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *AMS 8th Conference on Applied Climatology*, (January), 179–184. <https://doi.org/citeulike-article-id:10490403>
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010, September 14). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Monitor de Sequía en México. (2002). Retrieved June 14, 2018, from

<https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>

Monreal, T. E., Calvo-rubio, F. C., Estrela Monreal, T., Cabezas Calvo-rubio, F., & Estrada Lorenzo, F. (1999). La evaluación de los recursos hídricos en el Libro Blanco del Agua en España. *Ingeniería Del Agua*, 6(6), 125–138.

<https://doi.org/10.4995/ia.1999.2781>

Moore, J. (1996). No TitleCountry paper of the United Kingdom, Proceedings of management and prevention of crisis situations; floods, droughts and institutional aspects,, third technical review. *Euraqua*.

MOPT (Ministerio de Obras Públicas y Transportes). (1992). Instrucción de Planificación Hidrológica. ORDEN de 24 de septiembre de 1992 por la que se aprueban las instrucciones y recomendaciones técnicas complementarias para la elaboración de los Planes Hidrológicos de cuencas intercomunitarias (pp. 35023–35026). Madrid, España: Ministerio de Obras Públicas y Transportes de España.

Nalbantis, I. (2008). Evaluation of a Hydrological Drought Index. *European Water*, 2324, 67–77. Retrieved from [http://www.ewra.net/ew/pdf/EW\\_2008\\_23-24\\_06.pdf](http://www.ewra.net/ew/pdf/EW_2008_23-24_06.pdf)

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290.

[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

Nyman, L., & Laakso, M. (2016, October). Notes on the History of Fork and Join. *IEEE Annals of the History of Computing*. Oxford University PressBiometrika Trust.

<https://doi.org/10.1109/MAHC.2016.34>

Ortega, D., & Velasco, I. (2013). Aspectos socioeconómicos y ambientales de las sequías en México. *Research Gate*, 5, 78–90.

Palmer, & Wayne C. (1965). Meteorological Drought. Research Paper. *Weather Boreau*, 45, 158. Retrieved from <https://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/docs/palmer.pdf>

Paredes-Arquiola, J., Solera, A., Andreu, J., & Lerma, N. (2012). *Manual técnico de la herramienta EVALHID para la evaluación de recursos hídricos*. Grupo de Hidráulica y Medio Ambiente; Universidad Politécnica de Valencia.

Pavanello, D., Zaaïman, W., Colli, A., Heiser, J., & Smith, S. (2015). Statistical functions

- and relevant correlation coefficients of clearness index.  
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.05.012>
- Pedro-Monzonís, M., Ferrer, J., Solera, A., Estrela, T., & Paredes-Arquiola, J. (2015). Key issues for determining the exploitable water resources in a Mediterranean river basin. *Science of The Total Environment*, 503–504, 319–328.  
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2014.07.042>
- Pedro-Monzonís, M., Jiménez-Fernández, P., Solera, A., & Jiménez-Gavilán, P. (2016). The use of AQUATOOL DSS applied to the System of Environmental-Economic Accounting for Water (SEEAW). *Journal of Hydrology*, 533, 1–14.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.034>
- Pérez, J. (2016). *EVALUACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA EN LA CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC RH18J*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Pouget, L., Escaler, I., Guiu, R., Mc Ennis, S., & Versini, P.-A. (2012). Global Change adaptation in water resources management: The Water Change project. *Science of The Total Environment*, 440, 186–193.  
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2012.07.036>
- Prem B Parajuli, Kyle R Mankin, & Philip L Barnes. (2007). New Methods in Modeling Sources Specific Bacteria at Watershed Scale Using SWAT. In *Watershed Management to Meet Water Quality Standards and TMDLS (Total Maximum Daily Load) Proceedings of the 10-14 March 2007, San Antonio, Texas*. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers.  
<https://doi.org/10.13031/2013.22476>
- PRONACOSE. (2013). PRONACOSE. Retrieved from <http://www.pronacose.gob.mx/>
- Puth, M.-T., Neuh, M., Auser, €, Ruxton, G. D., & Ruxton, G. D. (2014). Effective use of Pearson's productmoment correlation coefficient.  
<https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2014.05.003>
- Sahuquillo, A. (1983). An eigenvalue numerical technique for solving unsteady linear groundwater models continuously in time. *Water Resources Research*.  
<https://doi.org/10.1029/WR019i001p00087>
- Sahuquillo, A., Cassiraga, E., Solera, A., & Murillo, J. M. (2011). *Modelos de uso conjunto de aguas superficial y subterránea*. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de

España.

- Salas, J. D. (Jose D. . (1980). *Applied modeling of hydrologic time series*. Water Resources Publications. Retrieved from <https://es.scribd.com/document/369714967/Applied-Modeling-of-Hydrologic-Time-Series>
- Sánchez, S. T., & Andreau, J. (1999). *Gestión de Sistemas de Recursos Hídricos con toma de decisión basado en riesgo*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J. V., & Barbosa, P. (2015). The biggest drought events in Europe from 1950 to 2012. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 509–524. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2015.01.001>
- Suárez-Almiñana, S., Pedro-Monzonis, M., Paredes-Arquiola, J., Andreu, J., & Solera, A. (2017). Linking Pan-European data to the local scale for decision making for global change and water scarcity within water resources planning and management. *Science of The Total Environment*, 603–604, 126–139. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.05.259>
- Sulis, A., & Sechi, G. M. (2013). Comparison of generic simulation models for water resource systems. *Environmental Modelling & Software*, 40, 214–225. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.012>
- Témez, J. R. (1977). Modelo Matemático de transformación “precipitación-escorrentía”. *Asociación de Investigación Industrial Eléctrica*, 39.
- Tyagi, S. K. (2015). Correlation coefficient of dual hesitant fuzzy sets and its applications. *Applied Mathematical Modelling*, 39(22), 7082–7092. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.02.046>
- UPV. (n.d.). MASHWIN MODELO DE ANÁLISIS DE SERIES HIDROLÓGICAS. Retrieved from <https://www.upv.es/aquatool/files/manuales/ManMashwinEsp.pdf>
- UPV. (2011). *AQUIVAL; Módulo para el preproceso y simulación de acuíferos; Manual de Usuario*. (D. de H. y M. Ambiente, Ed.). Valencia, España.
- Valiente, Ó. M. (2001). Sequía : Definiciones , Tipologías Y Métodos De Cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, 26, 59–80. <https://doi.org/10.14198/INGEO2001.26.06>
- Velasco, I., & Aparicio, J. (2004). Evaluación de índices de sequía en las cuencas de afluentes del río Bravo/Grande. *Instituto Mexicano de Tecnología Del Agua*, XIX, 37–53.

- Vicente, D. J., Rodríguez-Sinobas, L., Garrote, L., & Sánchez, R. (2016). Application of the system of environmental economic accounting for water SEEAW to the Spanish part of the Duero basin: Lessons learned. *Science of The Total Environment*, 563–564, 611–622. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.04.078>
- Wilm, H. G., Thornthwaite, C. W., Colman, E. A., Cummings, N. W., Croft, A. R., Gisborne, H. T., ... Taylor, C. A. (1943). Report of the Committee on Transpiration and Evaporation, 1942??43. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 24(2), 401–403. <https://doi.org/10.1029/TR024i002p00401>
- Zargar, A., Sadiq, R., & Khan, F. I. (2014). Uncertainty-Driven Characterization of Climate Change Effects on Drought Frequency Using Enhanced SPI. *Water Resources Management*, 28(1), 15–40. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0467-0>

## 10.-ACRÓNIMOS

### **A**

#### ARMA

Modelos Autorregresivos de Media Móvil ..... 28

### **B**

#### BANDAS

Banco Nacional de Aguas Superficiales ..... 40

### **Ch**

#### CHRT

Cuenca hidrológica del Río Tepalcatepec ..... 4

### **C**

#### CLICOM

Bases de Datos de Clima Computadorizado ..... 55

### **D**

#### DR

Distritos de Riego ..... 92

### **E**

#### ETP

Evapotranspiración Potencial ..... 14

#### EVALHID

Evaluación de los Recursos Hídricos ..... 13

### **I**

#### InNS

Coefficiente de Nash-Sutcliffe de la Transformación Logarítmica ..... 22

#### IPE

Índice de Precipitación Estandarizada ..... 9

IRSOE	
Índice de Riesgo de Sequía Operativa Estandarizado .....	12
IS	
Índice de Estado .....	10
<b>M</b>	
MASHWIN	
Modelo de Análisis de Series Hidrológicas .....	28
MPE	
Modelo Precipitación Escorrentía .....	13
MR	
Módulos de Riego .....	92
<b>N</b>	
NS	
Nash-Sutcliffe .....	21
<b>P</b>	
Pi	
Flujo entrante de Precipitación .....	17
PRONACOSE	
Programa Nacional Contra las Sequías.....	3
<b>R</b>	
$r^2$	
Coeficiente de Correlación de Pearson .....	22
REPDA	
Registro Público de Derechos de Agua .....	41
RN	
Régimen Natural .....	46
RSO	
Riesgo de Sequía Operativa.....	107

## **S**

### SCE-UA

Shuffled Complex Evolution..... 20

### SDI

Índice de Sequía Estandarizado ..... 12

### SIMGES

Modelo de Gestión..... 15

### SIMRISK

Simulación del Riesgo de Sequía ..... 35

### SMHI

Servicio Meteorológico e Hidrológico..... 19

### SPI

Índice de Precipitación Estandarizado ..... 12

### SRH

Sistemas de Recursos Hídricos..... 2

### SS

Simetría de Simulación ..... 23

### SSD AQUATOOL

Sistema de Soporte a la Decisión AQUATOOL ..... 12

## **U**

### UPV

Universidad Politécnica de Valencia..... 24