



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



MAESTRÍA EN INGENIERIA DE LOS RECURSOS HIDRICOS

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**Gestión de la sequía operativa en el sistema de
recursos hídricos de la cuenca del Rio Duero,
Michoacán.**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HIDRICOS

MIRH

PRESENTA:

Ing. Sergio Eduardo Cázarez Rodríguez

ASESOR:

Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe

CO-ASESOR:

Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera

MORELIA, MICH. FEBRERO 2021

RESUMEN

La sequía es un fenómeno natural que, a diferencia de otros fenómenos como inundaciones, incendios o ciclones, es difícil definir cuándo comienza o termina y tiene una larga duración, esto genera daños sociales y económicos mayores a los fenómenos antes mencionados. Una mala preparación para gestionar el recurso hídrico puede generar sequías operativas aunque la sequía climatológica no exista, esto hace referencia a que a pesar de que hay suficiente agua en el territorio, una mala gestión genera que el agua no alcance para cumplir las demandas.

El lago de Chapala es de los cuerpos de agua más grandes de México y su bajo nivel provocó alarma en el año 1980, esto condujo a la formación del primer consejo de cuenca y se establecieron reglas de operación para la cuenca Lerma-Chapala.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar las reglas de operación establecidas en la subcuenca del río Duero, que pertenece a la cuenca Lerma-Chapala, por medio de un modelo de gestión (que incluye oferta de agua, demandas e infraestructura hidráulica existente) y modelos estocásticos.

En el modelo de gestión se consideran los aportes (superficiales y subterráneos) y a partir de estos se generan series sintéticas equiprobables (con la misma probabilidad de ocurrencia que la serie histórica), lo que permite evaluar las reglas establecidas para posibles escenarios futuros y finalmente concluir si estas reglas son adecuadas o no para atender las demandas existentes en este sistema.

Modelación, sequia, gestión, riesgo, reglas de operación

ABSTRACT

Drought is a natural phenomenon that unlike other phenomena such as floods, fires or cyclones, it is difficult to define when it begins or ends and lasts, this generates social and economic damage greater than the aforementioned phenomena, poor preparation to manage the water resource, can generate operational droughts even if the weather drought does not exist, this refers to that although there is sufficient water in the territory, poor management means that the water does not reach to meet the demands.

Lake Chapala is one of the largest bodies of water in Mexico and its low level caused alarm in 1980, this led to the formation of the first basin council and operating rules were established for the Lerma-Chapala basin.

This work aims to evaluate the operating rules established in the douro river sub-basin, which belongs to the Lerma-Chapala basin through a management model (which includes existing water supply, demands and hydraulic infrastructure) and stochastic models.

In the management model it considers the contributions (superficial and underground) and from these generate equiprobable synthetic series (with the same probability of occurrence as the historical series), which allows to evaluate the rules established for possible future scenarios. and finally conclude whether or not these rules are appropriate to meet the demands existing in this system.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	2
Metodología para la evaluación de sequías.....	2
Modelos para la evaluación y gestión de la sequía operativa.....	2
La gestión del agua en México	4
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
JUSTIFICACIÓN	7
HIPÓTESIS	8
OBJETIVO GENERAL	8
OBJETIVOS PARTICULARES.....	8
METODOLOGÍA.....	9
Análisis de la Zona de estudio:	10
Validación, Selección y Análisis Estadística de los Datos climatológicos e hidrométricos	10
Validación de datos.....	11
Selección y análisis de datos	18
Modelación del Sistema Superficial:.....	19
Determinación de ETP	24
Calibración y validación del modelo superficial.	26
Traslado de parámetros por Métodos de agrupación.....	27
Modelación del Sistema Subterráneo	30
Solución de modelos autovalores	31
Modelo de Gestión Hídrica:	32
Generación de series sintéticas de caudales:.....	33
Modelo de Gestión de Sequía Operativa:	35
RESULTADOS OBTENIDOS	36
Análisis de la zona de estudio	36
Características físicas	37
Caracterización de las demandas del sistema	41
Reglas de operación	44
Características climatologías e hidrométricas	48
Infraestructura hidráulica.....	51

Validación, selección y Análisis Estadística de los Datos Climatológicos e Hidrométricos.....	55
GESTAD (GESTion de STADística de datos Climatologicos).....	56
Selección y análisis de datos en la zona de estudio	61
Modelación del sistema superficial.	68
Selección del modelo.	68
Identificación de microcuencas de modelación y traslado de datos.	69
Datos de entrada al modelo.	70
Resultados de validación y calibración de modelo superficial.....	71
Resumen de resultados	85
Traslado de parámetros	86
Modelación subterránea	89
Preparación de archivos para el modelo	89
Calibración del modelo.....	97
Modelo de gestión	98
Aportaciones al modelo de gestión	99
Demandas del sistema.....	99
Elementos hidráulicos del modelo.....	104
Calibración del modelo de gestión	108
Generación de series sintéticas.....	111
Modelo de gestión de sequía operativa	113
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	119
Análisis de la zona de estudio	119
Validación selección y análisis estadística de la zona de estudio.....	119
Modelación del sistema superficial	120
Modelación del sistema subterráneo	121
Modelo de Gestión Hídrica.	121
Generación de series sintéticas de caudales.....	122
Modelo de gestión de sequía operativa	123
CONCLUSIONES	125
LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	127
REFERENCIAS.....	128

INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento esencial para la vida, incluida la del hombre, debido a esto toda problemática relacionada con dicho elemento genera afectaciones directas a toda la sociedad y a los sectores económicos. Con el pasar del tiempo la creciente urbanización e industrialización, el crecimiento demográfico de la sociedad y la expansión de la agricultura, se ha generado un impacto importante en este recurso indispensable. La gestión del agua es un proceso indispensable que condiciona la existencia misma de las ciudades y su desarrollo (Caire, 2005).

Uno de los fenómenos que mayores interferencias genera en la gestión de los recursos hídricos es la sequía. Este fenómeno natural a comparación de otros fenómenos como pueden ser sismos, huracanes, incendios, +etc., no es un evento puntual y de corto plazo, y al estar relacionado a un elemento tan indispensable como lo es el agua genera impacto directo en la sociedad. En México, donde la agricultura de riego y de temporal es una fuente importante de empleo y de ingreso económico, las sequías representan un alto riesgo (Ortega y Velasco, 2013).

Muchas veces la sequía es confundida con el término aridez. La aridez se restringe a una región y se refiere a una zona de bajo nivel de precipitación, en cambio la sequía es un fenómeno temporal y no se restringe a una región o zona. Diversos estudios sobre la sequía se han llevado a cabo por lo que se tienen diferentes definiciones, en la actualidad es constantemente clasificada en dos grandes grupos: conceptual y operacional (Whilite, 1985). La primera se define como la deficiencia del recurso hídrico, dicha deficiencia puede ser analizada desde el punto de vista de la precipitación (sequía meteorológica), de los escurrimientos (sequía hidrológica), el agua en el suelo (sequía agrícola), o en función de su afectación (sequía económica o social). Por otro lado la sequía operacional hace referencia a la determinación de la probabilidad de fallo en los sistemas de recursos hídricos y la evaluación de los riesgos de las decisiones y medidas de mitigación según el riesgo admisible impuesto (Avilés y Solera, 2015).

ANTECEDENTES

Metodología para la evaluación de sequías

La sequía es un concepto al que estamos familiarizados, pero como en muchos casos resulta un concepto difícil de definir, la definición más común establece que es la deficiencia de precipitaciones durante un período de tiempo relativamente prolongado (Valiente, 2001).

En este punto es importante diferenciar un indicador de sequía de un indicador de escases, como es la sequía operativa, mientras que la sequía operativa se centra en la escasez de agua durante prolongados periodos de tiempo, un índice de sequía operativa indica la diferencia entre el agua disponible y la requerida por los usos establecidos, es por esto que la sequía operativa es también definida como un fallo en el sistema de recursos hídricos.

Estos hechos han llevado al estudio de la sequía operativa por distintos autores. Se ha demostrado que la determinación de la sequía operativa es aplicable a diferentes tipos de cuencas sin importar sus características propias (Sánchez, 1999). Es por esto que esta metodología permite establecer estrategias de prevención y gestión en diferentes ámbitos como el cambio climático y sequías.

Pita (2007) plantea la clasificación de los índices de sequía como indicadores de sequía, indicadores de escasez, indicadores de peligrosidad e indicadores de vulnerabilidad o fragilidad.

Modelos para la evaluación y gestión de la sequía operativa

Los modelos matemáticos de simulación y optimización se utilizan para estudiar las reglas de explotación y los suministros de las demandas de agua para alcanzar una gestión óptima de la sequía. Es preferible anticiparse mediante el establecimiento de ahorros en los suministros, pequeños déficits repartidos son mejores que un gran déficit de igual magnitud concentrado (Estrela, 2014).

Muchos modelos son construidos para casos particulares en cuencas específicas, sin embargo, existen otros modelos más generales que integran herramientas matemáticas, sistemas de información y bases de datos para ayudar al gestor de un sistema en el proceso de toma de decisiones. Estos son los denominados sistemas de soporte de decisiones (SSD) (Aviles *et al.*, 2016).

En 1987 se desarrolló el módulo Optired (Andreu, 1989), en el que se generaliza la resolución del problema de la asignación del agua mediante la generación de una red de flujo y el uso de algoritmos de programación lineal para el cálculo de la asignación óptima de recursos. Este módulo realiza la optimización de la gestión mensual para largos periodos de tiempo. Posteriormente se desarrolló el módulo de simulación de la gestión de cuencas SGC (Andreu *et al.*, 1989). Aunque desarrollado para la simulación, este modelo incluye también la optimización de una red de flujo conservativa que, a diferencia del modelo de optimización, se formula para resolver la gestión en un solo mes. En 1989 se utilizaron los módulos SGC y

Optired en el análisis de la gestión del río Mijares en España incluyendo la gestión conjunta de las aguas subterráneas (CHJ, 1990). A partir de 1990 se comenzaron a desarrollar nuevas aplicaciones para aumentar las posibilidades de análisis y para facilitar el uso de los modelos, lo que conforma un SSD más amplio orientado al análisis de la gestión integral de SRH. A este conjunto se le denomina AQUATOOL (Andreu *et al.*, 1991).

Se ha presentado una metodología para la evaluación del riesgo de sequía basada en la agregación probabilística de la evaluación óptima, la cual tiene una amplia gama de aplicaciones con respecto a la gestión de la sequía y prepara por ejemplo: identificación y definición de medidas para reducir la generación de las sequías operativas; definición de mejores indicadores para identificar el riesgo de sufrir una sequía operativa; y optimización de la implantación de las medidas consideradas más apropiadas (Haro *et al.*, 2014).

Los modelos numéricos y escenarios estocásticos se han utilizado para analizar si en la cuenca del río Paute en Ecuador, bajo ciertas condiciones de infraestructura (embalses de almacenamiento), son capaces de satisfacer demandas de agua en los siguientes 30 años. Los análisis revelaron la necesidad de implementar un embalse con una capacidad de al menos 21 Hm³ en la subcuenca del río Tomebamba, mientras que en la subcuenca del río Pindilig no se requerirá ningún embalse (Avilés y Solera, 2015).

La determinación de fallo mediante la aplicación del software AQUATOOL es ampliamente aplicada en las cuencas de España y ha demostrado que permite la toma de decisiones proporcionando la posibilidad de generar alternativas en la oferta y demanda de agua, muy necesarias para una planificación y gestión de sistemas de recursos hídricos en cuencas deficitarias de agua (Avilés *et al.*, 2015).

Se propone el uso combinado de dos modelos, un modelo de optimización de recursos hídricos y un modelo de generación de flujos atmosféricos estocásticos, para generar una serie de resultados que permitan evaluar el estado futuro del sistema. Los resultados muestran que la combinación de probabilidades de cambio de escenario con el sistema actual de monitoreo de sequía puede representar un avance importante hacia una gestión de sequía mejorada en el futuro, y agregar un valor significativo al enfoque nacional de Estado (Haro *et al.*, 2017).

Se han realizado estudios donde el principal punto de interés se centra en la evaluación de la predictibilidad de eventos extremos y sus posibles efectos, específicamente sequías y escasez, obteniendo que la disponibilidad del río Júcar en España es más entusiasta que la situación actual (Suárez *et al.*, 2017).

Actualmente AQUATOOL es una línea de investigación en continuo desarrollo, por lo que además de las herramientas de análisis de la gestión de cuencas, también proporciona otras herramientas que facilitan el desarrollo de trabajos relacionados.

La gestión del agua en México

En México la gestión se realiza a través de los distritos de riego y los consejos de cuenca, de los cuales el más antiguo es el consejo de cuenca del Lerma Chapala, la idea de la formación de este consejo de cuenca comenzó en 1980, cuando el presidente de la República Mexicana en turno se comprometió a recuperar el lago de Chapala. Es por ello que a lo largo de un año se trabajó en la propuesta de un programa de ordenamiento y saneamiento de los aprovechamientos hidrológicos de la cuenca. Como resultado el 13 de abril de 1989 se firma el acuerdo de coordinación dirigido al saneamiento y ordenamiento de la cuenca el cual fue firmado por el presidente de la república y los gobernadores de los 5 estados que comparten la cuenca (estado de México, Querétaro, Guanajuato, Michoacán y Jalisco).

En 1989 se constituye el consejo consultivo, precursor de lo que es hoy el consejo de cuenca el cual sería el encargado de realizar las acciones acordadas y se establece un año para la entrega de una propuesta del programa de trabajo.

Durante este tiempo se llevó a cabo un arduo trabajo para desarrollar una herramienta que permitiera establecer una nueva forma de distribución de agua, durante este proceso se elaboró un modelo matemático en Lotus 123 que posteriormente fue actualizado a Fortran. Este trabajo permitió desarrollar las reglas de operación que ahora se conocen.

Finalmente en 1991 se firman las políticas de distribución y acciones correspondientes a la gestión de la cuenca Lerma-Chapala, a partir de este momento se le otorga la potestad respecto al agua no asignada a la Comisión Nacional del Agua.

El 1° de octubre de 1992 se publica en el diario oficial de la federación el artículo 13, el cual concede a la Comisión Nacional del Agua la posibilidad de establecer consejos de cuenca. En diciembre de 1993 al consejo consultivo se le cambia el nombre a consejo de cuenca siendo este el primero en el país.

En febrero del 2002 la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) impulsa el denominado plan maestro para la cuenca Lerma-Chapala que gira alrededor de la sustentabilidad del lago, esto permitió establecer un convenio con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) para el desarrollo de un modelo de simulación, optimización y evaluación ambiental. Lamentablemente la idea de este plan es cancelada por decisión de los estados, sin embargo, el 22 de marzo del 2004 el nuevo secretario de la SEMARNAT retomó la idea y firma el Acuerdo de coordinación para la sustentabilidad de la cuenca.

El 14 de diciembre del 2004 se firma el convenio para el programa sobre la disponibilidad, distribución y usos de las aguas superficiales de propiedad nacional del área geográfica Lerma-Chapala 2001-2006.

La manera más efectiva de afrontar la sequía es por medio de las medidas preventivas, es por eso que en México se implementan programas, entre ellos el más importante es el Programa Nacional Contra la Sequía (PRONACOSE), actualmente gestionado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el cual consiste en la atención, seguimiento, mitigación y prevención al fenómeno recurrente de la sequía en el territorio nacional, el cual fue establecido en enero del 2014.

De este programa surge el Subprograma de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía (PMPMS). En este programa se suscriben brevemente los diversos tipos de sequía y sus causas probables. También se analizan aspectos de la sequía meteorológica.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las sequías ocupan el primer lugar entre los desastres naturales que más pérdidas económicas y humanas han provocado, datos del INEGI muestran que las sequías provocaron pérdidas económicas de aproximadamente 16,000 millones de pesos en el periodo 2011-2014. En particular la cuenca del Lerma-Chapala ha tenido muchos conflictos debido a la distribución del agua ocurriendo los peores eventos en 1993 y 2003, años en los cuales se presentaron múltiples enfrentamientos.

La cuenca del río Duero cuenta con una superficie de 2,531.3 km². De acuerdo con CONAGUA el 54% de la superficie de la cuenca (1,365 km²) está dedicada a la agricultura, lo que indica la dependencia económica que tiene la zona al agua para riego. A su vez la subcuenca del río Duero representa el 9.6% del producto interno bruto de Michoacán según datos de SEMARNAT (2015), lo que es un porcentaje importante considerando el aporte de cada cuenca mostrado en la Ilustración 1.

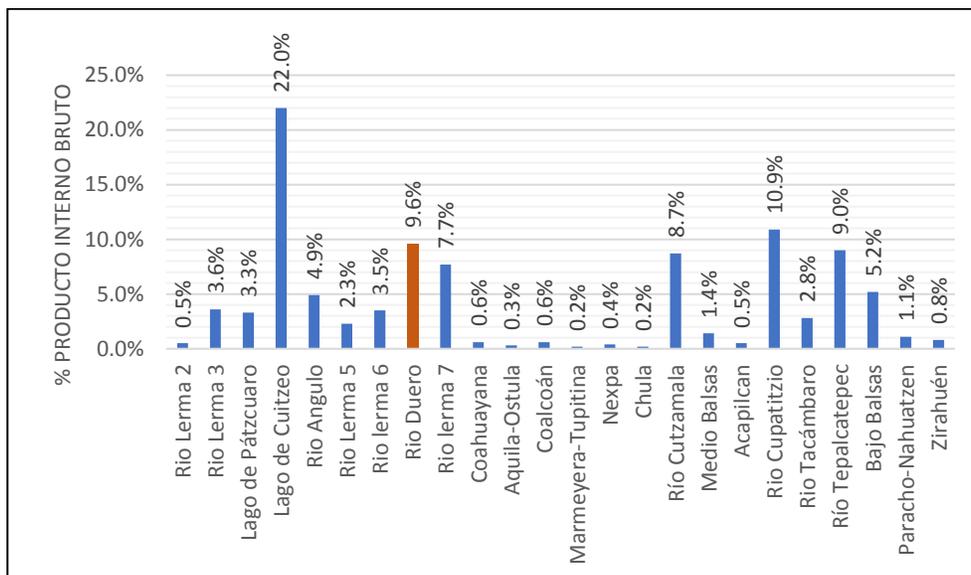


Ilustración 1.-Distribución del PIB 2015 por cuencas (CONAGUA, 2009).

La cuenca no cuenta con una regla de operación en específico ya que estas se establecen por distrito de riego (DR). La cuenca del río Duero cuenta con los distritos de riego DR061 Zamora y DR024 Ciénegas de Chapala, los cuales cuentan con una regla de operación (RO) cada uno, establecida por el programa de disponibilidad, distribución y usos de las aguas superficiales de propiedad nacional del área geográfica Lerma-Chapala 2001-2006, pero esta RO está centrada en mantener o recuperar el lago de Chapala en función del aporte de todas las cuencas, esto representa un análisis de manera indirecta de la sequía hidrológica y un análisis de esta permite hablar de la gestión en la cuenca.

JUSTIFICACIÓN

Estudios realizados por CNA (2009) revelaron que el escurrimiento natural promedio anual en la cuenca del río Duero es de 457.8 hm³/año, los usos consuntivos, demanda utilizada y pérdidas en embalses de almacenamiento de 369.7 hm³/año y cuenta con un volumen comprometido aguas debajo de 160.5 hm³/año, esto coloca a la cuenca en una situación de déficit o sequía operativa.

Tabla 1.- Disponibilidad para las cuencas en el Estado de Michoacán de la región hidrológica Lerma-Chapala (CONAGUA, 2009).

Cuenca		CP	Ar	Uc*	Uc**	R	Im	Ex	Ab	Rxy	Ab-Rxy	D	Clasificación
Clave	Nombre												
Cuencas en el estado de Michoacán													
D	Río Lerma 2	460.3	250.5	104.6	284	9	0	0	435.8	458.4	-22.6	0	Déficit
E	Río Lerma 3	369.1	435.8	114.4	365.9	9	0	0	448	490.1	-42.1	0	Déficit
L	Río Angulo	284	0	101.3	112.7	0.8	0	0	172.1	184.4	-12.3	0	Déficit
M	Río Lerma 5	482.1	189.7	443.0	949	81	563	0	367	460.6	-93.6	0	Déficit
N	Río Lerma 6	233.2	367	106.7	205.9	6.2	0	0	400.5	552.2	-151.7	0	Déficit
Ñ	Río Duero	457.8	0	239.1	369.7	27.7	0	0	115.8	160.5	-44.7	0	Déficit
P	Río Lerma 7	943.9	576.4	271.5	1897.4	19.4	0	237	-594.7	0.0	-594.7	0	Déficit
Q	CC Lago de Pátzcuaro	152.3	0	31.7	144.7	0.5	0	0	8.1	0.0	8.1	8.1	Disponibilidad
R	CC Lago de Cuitzeo	452.6	0	200.8	549.8	20	0	0	-77.2	0.0	-77.2	0	Déficit

donde

- Cp.-Escurrecimiento natural o “virgen” por cuenca propia;
- Ar.- Escurrecimiento aguas arriba;
- Uc*.- Usos consuntivos, REPDA al 30 de abril de 2002;
- Uc**.- Usos Consuntivos, demanda utilizada y pérdidas en vasos de almacenamiento;
- R.- Retornos;
- Im.- Importaciones;
- Ex.- Exportaciones;
- Ev.- Evaporación de embalses;
- Av.- Variación de almacenamiento en embalses;
- Ab.- Escurrecimiento hacia aguas abajo;
- Rxy.- Volumen comprometido hacia aguas abajo;
- D.- Disponibilidad.

Adicionalmente las reglas de operación de actual aplicación en la zona son las establecidas en el 2004 en base al modelo generado en esa época. Debido al constante cambio en las demandas y la variación en la disponibilidad del agua no es difícil pensar que es necesario revisar las reglas establecidas en ese momento para determinar si estas cuentan con un riesgo de sequía permisible.

Este estudio pretende ser complemento al PMPMS estableciendo una metodología que permita la evaluación de reglas de operación de un sistema de recursos hídricos considerando la sequía operativa.

HIPÓTESIS

Es posible evaluar los sistemas de recursos hídricos por medio de un sistema de soporte a la decisión que permita conocer el riesgo asociado a la sequía operativa establecida en la gestión.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema de soporte a la decisión para la evaluación de la gestión en el sistema de recursos hídricos, río Duero, Michoacán.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Obtener y validar los datos de precipitación, temperatura, escurrimiento, así como las características físicas como topografía, morfología y geología de la zona de estudio.
- Generar un modelo lluvia-escurrimiento de la zona de estudio.
- Generar un modelo del funcionamiento del flujo subterráneo.
- Realizar un modelo de gestión de recursos hídricos para la zona de estudio.
- Realizar un modelo de gestión que evalué el riego asociado a las reglas de operación establecidas.

METODOLOGÍA

El establecer reglas de operación en sistemas de recursos hídricos complejos directamente y determinar el riesgo que generan dichas reglas resulta imposible ya que esto requieren tiempo y pone en riesgo el sistema, por lo que hablar de modelación es obligatorio para estos fines. La modelación puede ser física o matemática, en este trabajo de investigación se optó por un modelo matemático que permita desarrollar un sistema de soporte a la decisión (SSD) entendible que permita tanto al investigador como a un técnico, la interpretación de los datos obtenidos para la toma correcta de decisiones.

Para esto hay que entender que un sistema de soporte a la decisión para un sistema de recursos hídricos debe incluir:

- Manejo de base de datos.
- Identificación y relación de los elementos que afectan el recurso.
- Modelos de simulación y optimización de recursos.
- Capacidad de mostrar y sintetizar resultados y;
- Una única interfaz amigable que conjunte lo anteriormente mencionado.

Para lograr el objetivo planteado en este trabajo de investigación es necesario seguir la metodología que se plantea en la Ilustración 2.

Ilustración 2.

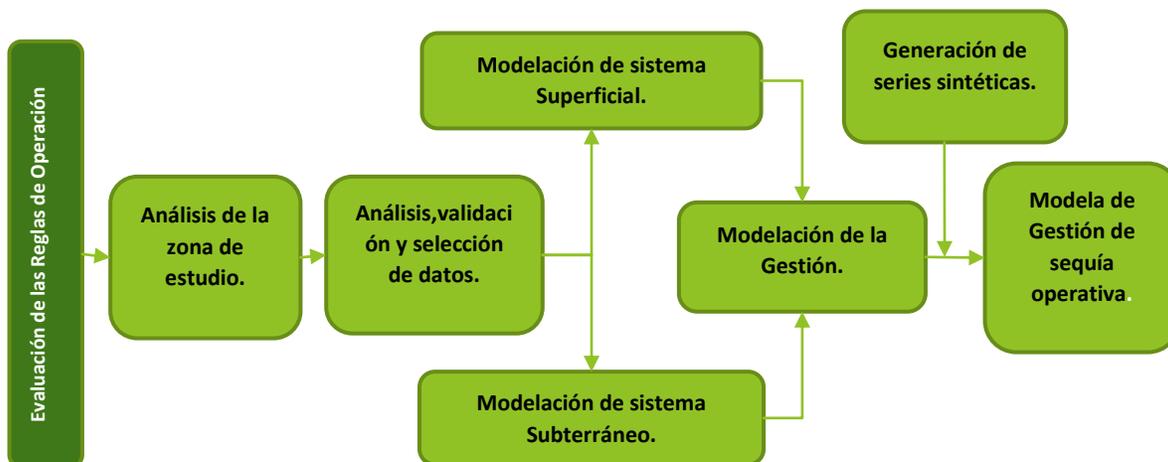


Ilustración 2.- Esquema de la metodología a seguir para el desarrollo del trabajo de investigación.

Análisis de la Zona de estudio

Esta primera etapa consiste en definir una zona de estudio, dicha zona debe cumplir con las características y requisitos requeridos para que el estudio sea correcto, para eso se pueden consultar varias fuentes de información como las siguientes:

- Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL).
- Programa Nacional de Sequías (PRONACOSE).
- Sistema Meteorológico Nacional (Monitor de Sequías de México).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Etc.

Este proceso tiene por objetivo identificar las posibles zonas de estudio, sus características, así como los impedimentos que se pueden presentar en el estudio de dicha zona. Es de vital importancia revisar que dichas zonas cuenten con la información suficiente para el estudio, principalmente datos de precipitación, temperatura, hidrometría, topografía, sistemas de recursos hídricos regulados (presencia de embalses), etc.

Lo primero es recopilar información correspondiente a la zona de estudio tanto de sus características físicas, sociales y climáticas.

Posteriormente se identifica y delimita la zona de estudio, para esto existen muchas fuentes de información como puede ser INEGI, Google Earth, CONABIO y visitas físicas a la zona, de donde se puede encontrar información referente a la topografía, recursos naturales y datos de geoestadística nacional y estatal.

Para determinar las características climáticas de la zona en estudio se requiere consultar información de las distintas bases de datos establecidas, tanto de precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas de la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional por medio de la página de CLICOM (CLimate COMputing Project) (CICESE, 2018), como de hidrometría del banco nacional de datos de aguas superficiales (BANDAS) (CONAGUA, 2018).

Validación, Selección y Análisis Estadístico de los Datos climatológicos e hidrométricos

Como parte de la metodología se plantea la aplicación de series sintéticas, lo que implica hablar de una modelación estocástica. Los modelos estocásticos se fundamentan principalmente en el máximo aprovechamiento de la información de la serie histórica de un conjunto de variables, es decir, reproducir las estadísticas de las series de datos históricos medidos. El concepto clave en este tipo de modelos es la correlación temporal entre las series de datos (Aviles *et al.*, 2016).

En muchas ocasiones la información es objeto de modificaciones, alteraciones o pérdida, esto debido a errores de equipo, de bases de datos o humanos. Por lo anterior, antes de emplear cualquier tipo de información es necesario validarla, para posteriormente seleccionar la información importante y poder analizarla de manera adecuada.

Validación de datos

Para un análisis de probabilidad de ocurrencia de eventos, en este caso de sequías, para que se produzcan resultados cercanos a la realidad o útiles, es necesario que los datos sean significativos, adecuados y precisos.

Referirnos a que los datos sean significativos quiere decir que si lo que estamos analizando en este caso es la sequía, los datos deben reflejar la presencia o ausencia de agua para distintos periodos de tiempo, es por ello que los datos reunidos y analizados corresponden a los datos de precipitación y escurrimiento de la zona en estudio.

Cuando se habla de datos adecuados se refiere a la cantidad y calidad de estos, si se cuenta con periodos de datos muy cortos, los resultados obtenidos tienden a ser menos confiables. Es por esto que se recomienda contar con al menos 25 años de datos efectivos.

La precisión de la serie de datos es uno de los principales problemas al momento de analizar una serie histórica, esto se refiere principalmente a la homogeneidad o también conocida como estacionariedad en los datos. Se dice que los datos tienen una tendencia homogénea o correspondan a una misma muestra ya que comparten características entre sí, es decir, a pesar de ser valores diferentes, corresponden a la misma serie de datos. En caso de que no se cumpla la homogeneidad podría interpretarse que los datos fueron alterados o no fueron tomados correctamente.

Para cumplir este objetivo se cuenta con pruebas estadísticas que evalúan la consistencia de los datos. Las cuales son pruebas gráficas, pruebas de homogeneidad, tendencia y persistencia. Ejemplos de estas pruebas se muestran a continuación.

Pruebas graficas

Los métodos gráficos sirven para apreciar inicialmente por simple inspección el comportamiento de la serie histórica permitiendo tener una idea general del comportamiento, muchas veces este comportamiento puede ser complicado de identificar por algunos cambios abruptos, para apreciar de mejor manera el comportamiento de los datos se puede calcular y graficar ventanas móviles, para esto se recomienda usar una ventana móvil de 5 años para precipitación y 3 para escurrimientos, ya que estos últimos tienen un comportamiento menor errático.

Esta ventana móvil consiste en determinar el promedio de los primeros datos con forme a la ventana, para posterior mente desplazarse 1 posición y calcular nuevamente la media de este nuevo grupo de datos y repetir este procedimiento hasta utilizar todos los datos Ecuación (Ec. 1). Esta nueva serie de datos se gráfica

y es más fácil identificar el comportamiento de la serie, es importante mencionar que estos son métodos tentativos por lo que pueden variar dependiendo del punto de vista de quien los analice.

$$\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \frac{x_2 + x_3 + \dots + x_{n+1}}{n}, \frac{x_3 + x_4 + \dots + x_{N+2}}{n}, \dots \quad (\text{Ec. 1})$$

Pruebas de Homogeneidad

Estas pruebas tienen como objetivo demostrar que los datos no cambian, esto se debe a que la climatología al ser una serie de eventos cíclicos se dice que tiende a mantener una homogeneidad en grandes periodos de tiempo.

Test de Secuencias

Test de secuencias es un método que busca analizar los datos respecto a la mediana y contando el número de cambios presentes en la serie de datos consecutivos y verificar que el número de cambios existentes se encuentre entre el rango de datos indicado en la Tabla 2, según el número de datos (N).

Tabla 2.- cambios permitidos para el test de Helmer (Campos, 2011)

N	U		N	U		N	U		N	U	
12	5	8	22	9	14	32	13	20	50	22	30
14	5	10	24	9	16	34	14	21	60	26	36
16	6	11	26	10	17	36	15	22	70	31	41
18	7	12	28	11	18	38	15	23	80	35	47
20	8	13	30	12	19	40	16	25	100	45	57

Test de Helmert

Es un método que analiza los datos denominando secuencias (S) a aquellos datos consecutivos que mantienen la misma posición con respecto a la media (Mayor o menor) y denominándolo como cambio (C) en caso contrario, este método se aplica a la serie de datos consecutivos más grande que se tenga descartando el resto de los valores (Campos, 2011). Una vez que se analizaron los datos se aplica el criterio mostrado en la Ecuación (Ec. 2).

$$-\sqrt{n-1} \leq (s - c) \leq \sqrt{n-1} \quad (\text{Ec. 2})$$

Test de t-Student

El Test de t-student en una prueba que permite probar si la media de una serie de datos es igual que la de otra, esto en series de precipitación permite comparar la media de la primera mitad de los datos contra la segunda mitad permitiendo demostrar que la serie en ambas secciones tiene la misma media por lo que es homogénea. La prueba se basa en determinar un estadístico (t) por medio de la aplicación de la Ecuación (Ec. 3).

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 \delta_1^2 + n_2 \delta_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{0.5}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

- $n_1, \delta_1^2, \bar{x}_1$ son el numero de datos, la varianza y la media de la primera mitad del grupo de datos.
- $n_2, \delta_2^2, \bar{x}_2$ son el numero de datos, la varianza y la media de la segunda mitad del grupo de datos.

Este estadístico debe encontrarse entre los límites establecidos (tr) por una distribución t de student de dos colas con un nivel de significancia del $\alpha=0.05$ y N-2 grados de libertad (Escalante y Reyes 2002).

Una limitación de este método es la cantidad de datos ya que si se tiene una serie muy grande puede arrojar resultados erróneos.

Test de Cramer

De manera similar a la prueba t Student la homogeneidad de la muestra, pero este método divide la muestra en 3 bloque, el primero del tamaño total de la muestra (n_j), el segundo (n_{60}) toma el 60% de los últimos datos de (n_j) y el tercer grupo (n_{30}) toma el 30% de los últimos datos de n_j .

La prueba compara el valor de la media \bar{X}^j del registro total con cada una de las medias de los bloques elegidos $\bar{X}_{60}^j, \bar{X}_{30}^j$. Para que se considere la serie analizada como estacionaria en la media o homogénea, se deberá cumplir que no existe diferencia significativa entre las medias de los bloques para esto se usan las Ecuaciones (Ec. 4), (Ec. 5), (Ec. 6) y (Ec. 7) Para $w=60$ y $w=30$.

$$t_w = \left\{ \frac{n_w(n_j - 2)}{n_j - n_w \left[1 + (\tau_w^j)^2 \right]} \right\}^2 \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\tau_w^j = \frac{\bar{X}_w^j - \bar{X}^j}{\delta_Q^j} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\bar{X}_w^j = \sum_{k=1}^{n_w} \frac{\bar{X}_w^j}{n_w} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\delta_x^j = \left[\frac{1}{(n_w - 1)} \sum_{k=1}^{n_j} (x_i^j - \bar{X}^j)^2 \right]^{0.5} \quad (\text{Ec. 7})$$

Este estadístico (t_w) tiene distribución t - student de dos colas con $n_{30}+n_{60}-2$ grados de libertad y un nivel de significancia $\alpha=0.05$, si el valor de t_w es menor a los límites de la distribución t-studen para $w=60$ y $w=30$ se concluye que la serie es homogénea (Escalante y Reyes 2002).

Test de Bartlett

Introducida por Bartlett en 1937, es una modificación del test de Newman y Pearson para “corregir el sesgo”, esta prueba es la que se utiliza con más frecuencia para probar la homogeneidad de las varianzas En esta prueba los n_i en cada tratamiento no necesitan ser iguales; sin embargo, se recomienda que los n_i no sean menores que 3 y muchos de los n_i deben ser mayores que 5.

El estadístico de la prueba está definido por las Ecuaciones (Ec. 8) y (Ec. 9)

$$U = \frac{1}{C} \left[(N - k) \ln(\delta^2) - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \ln(\delta_i^2) \right] \quad (\text{Ec. 8})$$

$$C = 1 + \frac{1}{3(k-1)} \left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i - 1} - \frac{1}{N - k} \right) \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde

N es la cantidad de datos de la serie

K es el número de grupos en los que se dividirá la muestra (mínimo 2)

n_i es el número de datos en el grupo i ésimo.

δ_i^2 es la varianza del grupo i ésimo.

Cuando la hipótesis nula es cierta, el estadístico tiene distribución aproximadamente χ^2 con $k - 1$ grados de libertad (Correa, et al 2006).

Pruebas de tendencia

Las pruebas de tendencia persiguen un objetivo similar a las pruebas de homogeneidad ya que si la climatología no cambia en el tiempo deberá mantener la misma tendencia.

Pendiente de regresión lineal simple.

Esta prueba consiste en demostrar si existe tendencia en los datos a partir de ajustar una recta de regresión simple común mente determinada por el método de mínimos cuadrados Ecuación (Ec. 10).

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n xy - \sum_{i=1}^n x \sum_{i=1}^n y}{\sum_{i=1}^n x^2 - (\sum_{i=1}^n x)^2} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde y representa la serie de tiempo, x la serie de datos correspondiente a la serie de tiempo y m la pendiente de regresión.

Una vez determinada la pendiente el estadístico que indica si la pendiente es representativa se calcula con las Ecuaciones (Ec. 11), (Ec. 12) y (Ec. 13).

$$tr = \frac{m}{SE^2} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$SE^2 = \frac{Se^2}{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$Se^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}{N - 2} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde

- SE^2 es el error estándar.
- Se^2 es la varianza del error de ajuste.
- N el número de datos de la serie.

Final mente el estadístico tr se compara con la distribución t student para una significancia de $\alpha=0.5$ y grados de libertad $N-2$ en caso de ser tr menor a la prueba t student se afirma la hipótesis de tendencia insignificante.

Test de Spearman.

En esta prueba no paramétrica que se conoce como correlación del orden de rangos primero se ordenan los datos de menor a mayor y se sustituye cada elemento del registro por su rango (k_i), después para cada dato de la serie original se calculan las diferencias: $d_i = k_i - i$, con $i = 1$ a n y se evalúan los estadísticos mostrados en las Ecuaciones (Ec. 14) y (Ec. 15).

$$ts = R_k \sqrt{\frac{N - 2}{1 - R_k^2}} \quad (\text{Ec. 14})$$

$$R_k = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{N(N^2 - 1)} \quad (\text{Ec. 15})$$

El valor de ts se compara con el intervalo definido por la distribución t -student de 2 colas para un nivel de significancia $\alpha=0.05$ y $n-2$ grados de libertad (Campos 2015).

Test de Mann Kendall

Esta prueba paramétrica es muy efectiva si la tendencia fundamental es de tipo lineal o se aproxima a esta. Su procedimiento consiste en evaluar el número p , en todos los pares de observaciones (x_i, x_j ; con $i = 1$ a $n-1$; $j = i + 1$ a n) en que x_j es

mayor que x_i , después se calculan las estadísticas de las Ecuaciones (Ec. 16), (Ec. 17) y (Ec. 18)

$$Z_k = \frac{s + 1}{\sqrt{V(s)}} \quad (\text{Ec. 16})$$

$$V(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (\text{Ec. 17})$$

$$s = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sig}(x_j - x_i) \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde

$$\begin{aligned} \text{Si } (x_j - x_i) > 0 & \quad \text{sig}(x_j - x_i) = 1 \\ \text{Si } (x_j - x_i) = 0 & \quad \text{sig}(x_j - x_i) = 0 \\ \text{Si } (x_j - x_i) < 0 & \quad \text{sig}(x_j - x_i) = -1 \end{aligned}$$

Nota: t representa el número de grupos en los que se repite la misma variable, pero como en series de precipitación o gasto es poco probable que se repita una lectura se omite la parte $\sum_t t(t-1)(2t+5)$ en la ecuación (Ec. 17).

Si el valor absoluto de Z_k es mayor que el valor crítico de la distribución normal estándar, la serie presenta tendencia creciente o decreciente con un nivel de significancia $\alpha=0.05$ (Cantor y Ochoa 2011).

Pruebas de Dependencia o persistencia.

Estudios realizados a lo largo del tiempo han demostrado que una característica que suele describir las series históricas es su dependencia o persistencia (Alvarez y Salas 1989) en el caso de las series de precipitación cuentan con independencia, pero las series de escurrimientos suelen ser persistentes al menos para el primer año, aunque esto no se cumple siempre (Campos 1992) es por esto que este tipo de pruebas nos permite identificar la serie analizada.

Límites de Anderson

La cuantificación de la persistencia se realiza con base en el coeficiente de correlación (r_k) para un orden o desfase k el cual indica que tan fuerte está siendo afectado un evento por el anterior (Campos A 2011). Este estadístico se determina por medio de la Ecuación (Ec. 19).

$$r_k = \frac{cov(x_i, x_{i+k})}{\sqrt{var(x_i) * var(x_{i+k})}} \quad (Ec. 19)$$

Este método establece unos límites de confianza los cuales dependen de la cantidad de datos en la serie, de tal forma que a mayor cantidad de datos más cerrados serán los límites y mayor grado de confianza tendrán, en caso de contar con pocos datos los límites de abren generando mayor incertidumbre. Os limites están definidos por la Ecuación (Ec. 20).

$$Lim = \frac{-1 \pm 1.964\sqrt{n-2}}{n-1} \quad (Ec. 20)$$

En el caso de series de precipitación esta prueba se aplica para un numero de desfaces $k=n/3$ si el 95% de los r_k se encuentran dentro de los limites se considera una serie independiente, en el caso de las series de escurrimientos se debe observar si es persistente (dependiente) para cada desface para de esta forma indicar que es persistente hasta k desfaces.

Wald-Wolfowitz

La prueba de Wald-Wolfowitz es generalmente la prueba principal usada para verificar la dependencia. Esta prueba detecta si un patrón es dependiente estadísticamente, esto mediante el evaluar el carácter de aleatoriedad de una secuencia de registros históricos. Para esto el método genera corridas de datos sobre la media y bajo la media y evalúa si estos cambios representan un carácter aleatorio con apoyo en las Ecuaciones (Ec. 21), (Ec. 22) y (Ec. 23).

$$\mu_R = 1 + \frac{2nm}{n+m} \quad (Ec. 21)$$

$$Var[R] = \frac{2nm(2nm - n - m)}{(n+m)^2(n+m-1)} \quad (Ec. 22)$$

$$Z_W = \frac{\left(R \pm \left(\frac{1}{2}\right)\right) - \mu_R}{\sqrt{Var[R]}} \quad (Ec. 23)$$

Donde

- μ_R representa la media de las corridas
- n es son los datos de la serie sobre la media.

- m los datos bajo la media.
- R representa el número de corridas.

Esta prueba se compara con una distribución normal. Si el valor de Z_w calculado está dentro del rango del valor crítico de Z para $\alpha=0.05$ se dice que los datos son independientes.

Selección y análisis de datos

Una vez que se conoce que información es correcta es necesario seleccionar la información adecuada ya que tener mucha información complica los procesos y muchas veces no representa una mejora en el mismo, en caso contrario muy poca información resta confianza al análisis.

En la selección de información es fundamental que se considere la cantidad de datos disponibles, la distribución espacial y temporal, y la distancia al punto o zona de interés.

Llenado de datos faltantes

Una vez seleccionados los datos, es necesario revisar la continuidad temporal de los mismos, ya que los modelos requieren entradas de información continua para representar los modelos de forma adecuada. En México es común que estos datos no sean continuos debido a distintos factores, por lo que es necesario llenar los vacíos presentes por medio de procesos estadísticos como pueden ser la regresión lineal simple y múltiple o el Inverso de la distancia ponderada (IDW).

Regresión lineal simple

Este método permite determinar los datos faltantes de una serie de datos con apoyo en una o más series secundarias las cuales mantienen buena correlación con la serie que se desea llenar. Este método se representa por medio de una línea recta en un diagrama de dispersión generada a través del principio de mínimos cuadrados el cual está representado por la Ecuación (Ec. 24).

$$y = a_0 + a_1 * x = b + mx \quad (\text{Ec. 24})$$

Donde b es la ordenada al origen calculado con la Ecuación (Ec. 25) y m la pendiente calculada con la Ecuación (Ec. 10).

$$b = \bar{y} - m * \bar{x} \quad (\text{Ec. 25})$$

Regresión lineal múltiple

Se basa en el mismo principio que la regresión lineal simple con el adicional de que se usan dos o más series de datos secundarias generando como recta de ajuste una ecuación polinómica como se muestra en la Ecuación (Ec. 26)

$$y = a_0 + a_1 * x_1 + a_2 * x_2 + \dots + a_n * x_n \quad (\text{Ec. 26})$$

Inverso de la distancia ponderada (IDW)

Este método requiere de al menos 3 estaciones que rodeen la estación objetivo, el principio del método es sacar un promedio de los valores en las estaciones secundarias asignando mayor peso a las estaciones cercanas y disminuir dicho peso al alejarse del objetivo, (Díaz et al. 2008).

El peso en este caso está definido por la Ecuación (Ec. 27)

$$w_i = \frac{N \left(\frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta} \quad (\text{Ec. 27})$$

Donde:

N=número de estaciones secundarias.

$d_{e,i}$ =distancia a la estación objetivo de la estación secundaria.

β = coeficiente potencial (1 en caso de no querer considerarse).

Final mente la precipitación en la estación objetivo se estima con la Ecuación (Ec. 28).

$$p_e = \sum_{i=1}^N w_i * p_i \quad (\text{Ec. 28})$$

Este método también puede ser empleado también para el traslado de información de un conjunto de puntos a otro siempre y cuando los puntos con datos conocidos rodeen el punto de interés.

Modelación del Sistema Superficial:

Cuando se realiza la recopilación de datos es común percatarnos que es fácil encontrar datos de precipitación, pero los datos de escurrimiento son mucho más escasos, por lo que es necesario relacionar la precipitación con el escurrimiento, para esto las mejores herramientas son los modelos matemáticos de lluvia escurrimiento.

Existes diversos modelos matemáticos para determinar la relación lluvia-escurrimiento, los modelos más utilizados son los siguientes:

- El modelo de Témez: es un modelo sencillo desarrollado en España el cual cuenta con 4 parámetros y 2 variables de estado, debido a este número tan

reducido de parámetros es ampliamente utilizado mostrando buenos resultados para modelos lluvia-escorrentamiento.

- El modelo HBV: es un modelo desarrollado por el Instituto Meteorológico Sueco (SMHI) en 1970, cuenta con 7 parámetros y 4 variables de estado, este modelo a diferencia del anterior considera también el comportamiento de la nieve en los cálculos, además permite realizar modelos tanto diarios como mensuales.
- El modelo Sacramento: también conocido como SAC-SMA fue desarrollado por el National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) en colaboración con el National Weather Service (NWS), es un modelo conceptual, continuo, determinista, de entradas agrupadas, con un número alto de parámetro (17 parámetros y 6 variables de estado) y solo es cuantitativo.
- GR4J: es un modelo de origen francés que cuenta con 4 parámetros y 2 variables de estado, lo que lo diferencia de los modelos anteriores es que es un modelo empírico sin mucha explicación física.

En este caso el modelo empleado es el modelo de Témez y se describe más ampliamente a continuación.

Este modelo pertenece al grupo de los denominados modelos agregados de simulación de cuencas hidrográficas. 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 masa y materia, y está regulado por leyes específicas de reparto y transferencia entre los distintos términos del balance, como se muestra en la Ilustración 3.

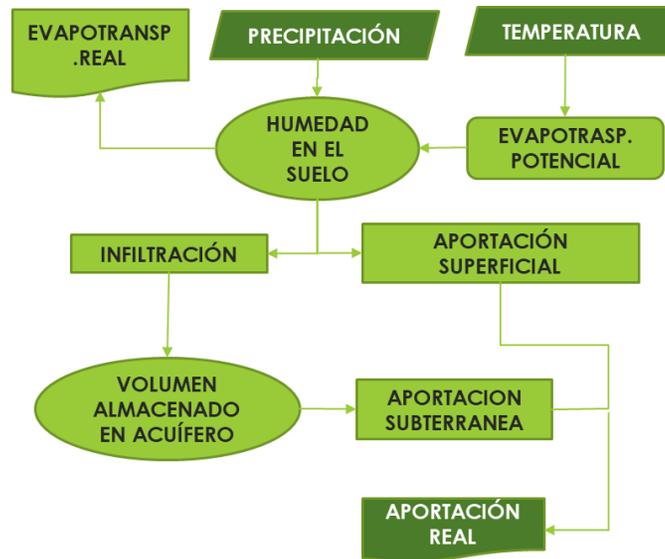


Ilustración 3.- Esquema de funcionamiento del modelo de Témez (Paredes et al., 2014).

El modelo realiza el cálculo considerando el terreno dividido en dos zonas, una superficial no saturada y otra en la parte inferior la cual actúa como el acuífero, bajo este sistema la precipitación (P) al llegar al terreno se distribuye de tres formas Ilustración 4.

Evapotranspiración real (E_t) es la parte de la humedad almacenada sobre la parte superior del suelo.

La humedad del suelo (H_t) que se almacena en la zona superior del suelo, cuyo límite es la capacidad máxima de almacenamiento hídrico (H_{max_t})

Excedente (T), este a su vez se descompone en un flujo de infiltración (I_t) y escurrimiento superficial (A_{sup}).

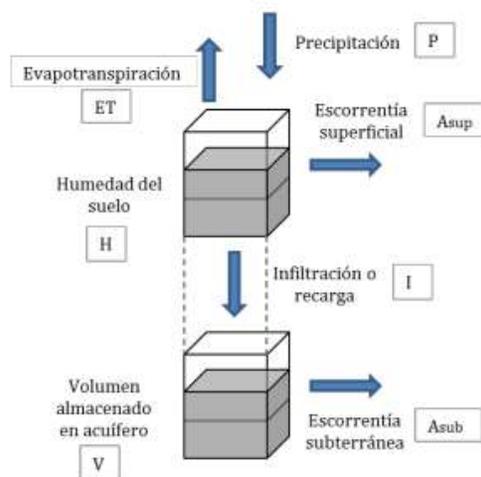


Ilustración 4 Distribución de las variables en el modelo de Témez (Paredes et al., 2017).

Bajo este esquema el modelo calcula el excedente total (T_t) bajo la siguiente ley:

$$T_t = \begin{cases} 0 & \text{si } P_t \leq P_0 \\ \frac{(P_t - P_0)^2}{P_t - \delta_t - 2P_0} & \text{si } P_t > P_0 \end{cases} \quad (\text{Ec. 29})$$

$$\delta = H_{max} - H_{t-1} + ETP_t \quad (\text{Ec. 30})$$

$$P_0 = C(H_{max} - H_{t-1}) \quad (\text{Ec. 31})$$

Donde:

- H_{max} es la capacidad máxima de almacenamiento del suelo (mm) para un tiempo t .
- H_{t-1} el almacenamiento de agua en el suelo (mm) en un mes $t-1$.
- ETP_t la evapotranspiración potencial (mm) para un mes t .
- C el coeficiente de inicio de excedente.

Una vez que se cuenta con el excedente total (T_t) se determina la humedad del suelo al final del mes t (H_t) con las Ecuaciones (Ec. 32) y (Ec. 33).

$$H_t = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ H_{t-1} + P_t - T_t - ETP_t \end{array} \right. \quad (\text{Ec. 32})$$

$$ETP_t = \text{min} \left\{ \begin{array}{l} H_{t-1} + P_t - T_t \\ ETP_t \end{array} \right. \quad (\text{Ec. 33})$$

Estas ecuaciones aseguran que siempre que exista suficiente agua en el suelo la evapotranspiración se desarrolla hasta alcanzar la evapotranspiración potencial. En caso de no haberla, la humedad en el suelo al final de mes será nula y la evapotranspiración real será menor a la potencial.

Una vez que se conoce el excedente es posible determinar al agua que se infiltra en un mes en la zona inferior del suelo mediante la Ecuación (Ec. 34).

$$I_t = I_{max} * \frac{T_t}{T_t + I_{max}} \quad (\text{Ec. 34})$$

De esta forma el agua que no se infiltra al acuífero se convierte en escurrimiento superficial para el mes t obedeciendo la Ecuación (Ec. 35).

$$A_{sup_t} = T_t - I_t \quad (\text{Ec. 35})$$

Para la determinación del aporte subterráneo para el mes A_{sub_t} se simula el comportamiento del acuífero como un modelo unicelular (una sola unidad) el cual

se basa en la curva de agotamiento de un manantial, donde la caudal cedido (Q_t) a la red superficial se define por la Ecuación (Ec. 55).

$$Q_t = \alpha * V_t \quad (\text{Ec. 36})$$

Donde

V_t es el volumen almacenado en el acuífero.

Si se aplica al acuífero una ecuación de balance de masas y simplificando esta ecuación (Paredes *et al.*, 2017a) se puede modelar el volumen en el acuífero (V_t) con la Ecuación (Ec. 37).

$$V_t = V_{t-1}e^{-\alpha\Delta t} + \frac{S * I_t}{\alpha}(1 - e^{-\alpha\Delta t}) \quad (\text{Ec. 37})$$

Este modelo cuenta con la ventaja de tener gran simplicidad de cálculo, pero la desventaja del mismo radica en esto mismo ya que al modelar acuíferos con más de una rama de descarga en el factor de agotamiento el modelo no es válido.

De estas ecuaciones podemos identificar los 4 parámetros del modelo, así como las 2 variables de estado en las cuales se debe proponer un estado inicial. Los anteriores se pueden aproximar con la ecuación (Ec. 38).

$$V_0 = \frac{Q_0}{\alpha} \quad (\text{Ec. 38})$$

En la Tabla 3 se muestran los parámetros, así como sus límites máximos y mínimos recomendables para la modelación.

Tabla 3.- Límites iniciales para los parámetros del modelo de Témez (Paredes *et al.*, 2017).

	Hmax (mm)	C	Imáx (mm)	α (mes ⁻¹)
min	50	0.2	10	0.001
máx.	250	1	150	0.9

Es importante resaltar la importancia de la calibración del modelo, ya que los parámetros no se conocen en la mayoría de los casos por lo que deben ser calculador mediante un proceso iterativo y posterior verificación de los resultados obtenidos, es decir, el modelo requiere de una calibración y validación, para esto es necesario utilizar los datos recopilados de las estaciones hidrométricas. Esto a su vez conlleva un problema y es que la mayoría de los aforos que se tienen en los cauces cuentan con un grado de alteración, es decir el hombre ya extrajo o introdujo gastos a los cauces, por lo que es necesario realizar una restauración a régimen natural, para esto al gasto medido (A) en la estación de aforo es necesario agregarle las derivaciones del agua antes del aforo (T), el agua extraída del acuífero si esta

tiene relación con el río (B), por otra parte restar el gasto que se vierte en los ríos antes de la estación de aforo (V), el agua que es traída de otras cuencas (Q), el agua que se extrae del acuífero si este no está conectado con el río (R) y sumar o restar el agua retenida o liberada por los embalses (S). La ecuación básica para este proceso es la Ecuación (Ec. 39).

$$N = A + T + B - V - Q - R + E \mp S \quad (\text{Ec. 39})$$

Esto debe hacerse con mucho cuidado para evitar duplicar consideraciones, es importante mencionar que, aunque la ecuación es sencilla, el conseguir la información histórica requerida es mucho más complicado, ya que muchas veces no se encuentran dichos datos, por lo que es necesario determinarlos por métodos indirectos.

Debido a lo anterior, existe otras opciones como lo es el traslado de información de una cuenca a régimen natural a otra con régimen alterado por medio de similitud hidrológica, este método permite trasportar los datos de una cuenca origen a una destino considerando las características físicas y climatológicas de las mismas.

Determinación de ETP

Para el cálculo de las ETP existen varios métodos, uno de los más utilizados en México debido a su fácil aplicación es el método de Thornthwaite (Aparicio, 1992).

Este método permite determinar los usos consuntivos mensuales considerando la temperatura (T) y la ubicación geográfica como se muestra en las Ecuaciones (Ec. 40), (Ec. 41), (Ec. 42) y (Ec. 43).

$$U_j = 1.6k_j \left(\frac{10T_j}{I} \right)^a \quad (\text{Ec. 40})$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad (\text{Ec. 41})$$

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514} \quad (\text{Ec. 42})$$

$$a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 179 \times 10^{-4} I + 0.492 \quad (\text{Ec. 43})$$

Donde:

- U_j es la evapotranspiración para el mes j.
- T_j es la temperatura del mes j.
- K_j son las horas promedio de sol del mes j obtenido de la Tabla 4.
- a e i son constantes del método.

Tabla 4.- Tabla de porcentaje de horas al año de luz kj (Aparicio, 1992).

LATITUD N.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
0	8.5	7.66	8.49	8.21	8.5	8.22	8.5	8.49	8.21	8.5	8.22	8.5
5	8.32	7.57	8.47	8.29	8.65	8.41	8.67	8.6	8.23	8.42	8.07	8.3
10	8.13	7.47	8.45	8.37	8.81	8.6	8.86	8.71	8.25	8.34	7.91	8.1
15	7.94	7.36	8.43	8.44	8.98	8.8	9.05	8.83	8.28	8.2	7.75	7.88
16	7.93	7.35	8.44	8.46	9.07	8.83	9.07	8.85	8.27	8.4	7.72	7.83
17	7.86	7.32	8.43	8.48	9.04	8.87	9.11	8.87	8.27	8.22	7.69	7.8
18	7.83	7.3	8.42	8.5	9.09	8.92	9.16	8.9	8.27	8.21	7.66	7.74
19	7.79	7.28	8.41	8.51	9.11	8.97	9.2	8.92	8.28	8.19	7.63	7.71
20	7.74	7.25	8.41	8.52	9.15	9	9.25	8.96	8.3	8.18	7.58	7.66
21	7.71	7.24	8.4	8.54	9.18	9.05	9.29	8.98	8.29	8.15	7.54	7.62
22	7.66	7.21	8.4	8.56	9.22	9.09	9.33	9	8.3	8.13	7.5	7.55
23	7.62	7.19	8.4	8.57	9.24	9.12	9.35	9.02	8.3	8.11	7.47	7.5
24	7.58	7.17	8.4	8.6	9.3	9.2	9.41	9.05	8.31	8.09	7.43	7.46
25	7.53	7.14	8.39	8.61	9.33	9.23	9.45	9.09	8.32	8.09	7.4	7.42
26	7.49	7.12	8.4	8.64	9.38	9.3	9.49	9.1	8.31	8.06	7.36	7.31
27	7.43	7.09	8.38	8.65	9.4	9.32	9.52	9.13	8.32	8.03	7.36	7.31
28	7.4	7.07	8.39	8.68	9.46	9.38	9.58	9.16	8.32	8.02	7.27	7.27
29	7.35	7.04	8.37	8.7	9.49	9.43	9.61	9.19	8.32	8	7.24	7.2
30	7.3	7.03	8.38	8.72	9.53	9.49	8.67	9.22	8.33	7.99	7.19	7.15
31	7.25	7	8.36	8.73	9.57	9.54	9.72	9.24	8.33	7.95	7.15	7.09
32	7.2	6.97	8.37	8.76	9.62	9.59	9.77	9.27	8.34	7.95	7.11	7.05
33	7.15	6.94	8.36	8.78	9.68	9.65	9.82	9.31	8.35	7.94	7.07	6.98
34	7.1	6.91	8.36	8.8	9.72	9.7	9.88	9.33	8.36	7.9	7.02	6.92
35	7.05	6.88	8.35	8.83	9.77	9.76	9.94	9.37	8.37	7.88	6.97	6.85
36	6.99	6.85	8.35	8.85	9.82	9.82	9.09	9.4	8.37	7.85	6.92	6.79
38	6.87	6.79	8.34	8.9	9.92	9.95	10.1	9.47	8.38	7.8	6.82	6.66
40	6.76	6.72	8.33	8.95	10.02	10.08	10.22	9.54	8.39	7.75	6.72	7.52
42	6.63	6.65	8.31	9	10.14	10.22	10.35	9.62	8.4	7.69	6.62	6.37
44	6.49	6.58	8.3	9.06	10.26	10.38	10.49	9.7	8.41	7.63	6.49	6.21
46	6.34	6.5	8.29	9.12	10.39	10.54	10.64	9.79	8.42	7.57	6.36	6.04
48	6.17	6.41	8.27	9.18	10.53	10.71	10.8	9.89	8.44	7.51	6.23	5.86
50	5.98	6.3	8.2	9.24	10.68	10.91	10.9	10	8.46	7.45	6.1	5.65
52	5.77	6.19	8.21	9.29	10.85	11.13	11.2	10.12	8.49	7.39	5.93	5.43
54	5.55	6.08	8.18	9.36	11.03	11.38	11.43	10.26	8.51	7.3	5.74	5.18
56	5.3	5.95	8.15	9.45	11.22	11.67	11.69	10.4	8.52	7.21	5.54	4.89
58	5.01	5.81	8.12	9.55	11.46	12	11.98	10.55	8.51	7.1	4.31	4.56
60	4.67	5.65	8.08	9.65	11.74	12.39	10.7	10.7	8.51	6.98	5.04	4.22

Calibración y validación del modelo superficial.

Para determinar la confiabilidad de la calibración y validación del modelo es necesario utilizar métodos estadísticos para verificar la bondad del ajuste, en este caso se plantea la aplicación de 4 estadísticos, cada uno de estos indica una característica del ajuste y se describen a detalle a continuación.

Eficiencia De Nash-Sutcliffe (NSE)

El criterio de Nash-Sutcliffe es uno de los más usados en Hidrología y toma un valor entre 0 y 1, siendo 1 una calibración perfecta. Este es un método que usa valores cuadráticos de las diferencias, esto tiene como resultado que los valores mayores de la serie temporal tengan un gran peso, por lo contrario, en caso de valores mínimos no los toma en cuenta, es decir, este estadístico nos indica que tanto se ajusta el modelo a los datos observados en los valores más altos o meses húmedos.

El estadístico está determinado por la Ecuación (Ec. 44).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_t^n (Qsim_i - Qobs_i)^2}{\sum_t^n (Qobs_i - \bar{Qobs})^2} \tag{Ec. 44}$$

Los valores de referencia para este estadístico son los mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5.- Valores de referencia para el ajuste de cálculo del criterio de Nash-Sutcliffe.

NSE	Ajuate
NSE <0.20	Insuficiente
0.2 NSE ≤0.40	Satisfactorio
0.40< NSE ≤0.60	Bueno
0.60< NSE ≤0.8	Muy Bueno
0.80< NSE ≤1.00	Excelente

Eficiencia Logarítmica de Nash-Sutcliffe (LNSE)

Este estadístico es una modificación de Nash-Sutcliffe, al sacar el logaritmo de las diferencias lo que permite es incrementar de manera significativa la influencia de los valores de menor magnitud manteniendo casi igual los valores máximos, como resultado este estadístico indica el grado de ajuste del modelo para los valores menores o meses secos. La ecuación de este estadístico es la mostrada en la Ecuación (Ec. 45).

$$LNSE = 1 - \frac{\sum_t^n (\ln(Qsim_i) - \ln(Qobs_i))^2}{\sum_t^n (\ln(Qobs_i) - \ln(\bar{Qobs}))^2} \tag{Ec. 45}$$

Coefficiente de correlación de Pearson (r)

Este estadístico es uno de los más utilizados por su fácil aplicación e interpretación. indica el grado de relación entre dos series sin penalizar el sesgo, en este caso los datos modelados y los datos observados. Los valores varían entre -1 y 1 siendo estos los máximos valores de covarianza, por otro lado, un valor de 0 indica una covarianza nula. El signo indica si la covarianza es ascendente o descendente, pero tiene el mismo valor -1 y 1 de tal forma que en la mayoría de los casos se toma el cuadrado del valor o el valor absoluto. La ecuación que define este estadístico es la Ecuación (Ec. 46).

$$r = \frac{\sum_t^n (Qsim_i - \bar{Qsim}) * (Qobs_i - \bar{Qobs})}{\sqrt{\sum_t^n (Qobs_i - \bar{Qobs})^2 * \sum_t^n (Qsim_i - \bar{Qsim})^2}} \quad (Ec. 46)$$

La Tabla 6 muestra la referencia para la calidad del ajuste con este estadístico.

Tabla 6.- Valores de referencia para el ajuste de cálculo del coeficiente de correlación de Pearson

r^2	Ajuate
$r^2 < 0.50$	Insuficiente
$0.50 < r^2 \leq 0.75$	Satisfactorio
$0.75 < r^2 \leq 0.90$	Bueno
$0.90 < r^2 \leq 1.00$	Excelente

Traslado de parámetros por Métodos de agrupación

Es común que en la moderación de cuencas hidrológicas no se cuente con una base de datos suficiente para calibrar una cuenca de manera detallada o completa, por lo que se recurre al traslado de parámetros calibrados de una cuenca modelada a otra, para esto existen métodos como la similitud hidrológica (Campos-Aranda, 2011).

Para este caso se plantea la aplicación de métodos de conglomeración o análisis Clúster, los cuales son métodos estadísticos multivariados que permiten agrupar elementos en función de sus características o variables generando grupos con características homogéneas entre sí denominados clústers. Esto permite determinar los posibles parámetros que pueden ser trasladados de cuencas calibradas a cuencas no calibradas.

La aplicación de métodos de agrupación clúster tienen como etapas principales las siguientes:

1. Elección de variables:

Esta selección debe reflejar los objetivos del investigador y tener relación con el mismo, en este caso se emplean características físicas de la cuenca que tengan relación con los parámetros hidrológicos y geohidrológicos de las mismas.

2. Elección de medida de asociación:

Existen varios métodos para medir asociación y el método empleado dependerá de las variables utilizadas, así como el criterio del analista; entre las medidas de asociación más comunes se encuentran las mostradas en la Tabla 7, de estas se emplea la distancia Euclídea comúnmente por su sencillez.

3. Elección de técnica de agrupación

A lo largo del tiempo se han desarrollado diversos métodos de agrupación clasificados primeramente en jerárquicos y no jerárquicos como se puede mostrar en la Ilustración 6.

La principal diferencia entre los métodos jerárquicos y los no jerárquicos es que los primeros ordenan por medio de un dendograma (Ilustración 5), permitiendo decidir el número de grupos en función con su distancia a los demás, así como su consolidación, por el contrario, los no jerárquicos necesitan del establecimiento previo de un número de grupos.

Tabla 7.- Medidas de asociación más comunes.

Nombre	Ecuación
Distancia Euclídea	$d_q(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{c=1}^p (x_{ic} - x_{jc})^2}$
Distancia de Minkowski	$d_q(x_i, x_j) = \left(\sum_{c=1}^p x_{ic} - x_{jc} ^q \right)^{\frac{1}{q}} \text{ donde } q \geq 1$
Distancia d1 o ciudad (City Block)	$d(x_i, x_j) = \sum_{c=1}^p x_{ic} - x_{jc} $
Distancia de Tchebychev o del máximo (q = ∞)	$d_{\infty}(x_i, x_j) = \max(c = 1, \dots, p) x_{ic} - x_{jc} $
Distancia de Mahalanobis	$D_s(x_i, x_j) = \sqrt{(x_i - x_j)' S^{-1} (x_i - x_j)}$
Distancia X ²	$x^2 = m \left[\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \frac{n_{ij}^2}{m_i \cdot m_j} - 1 \right]$

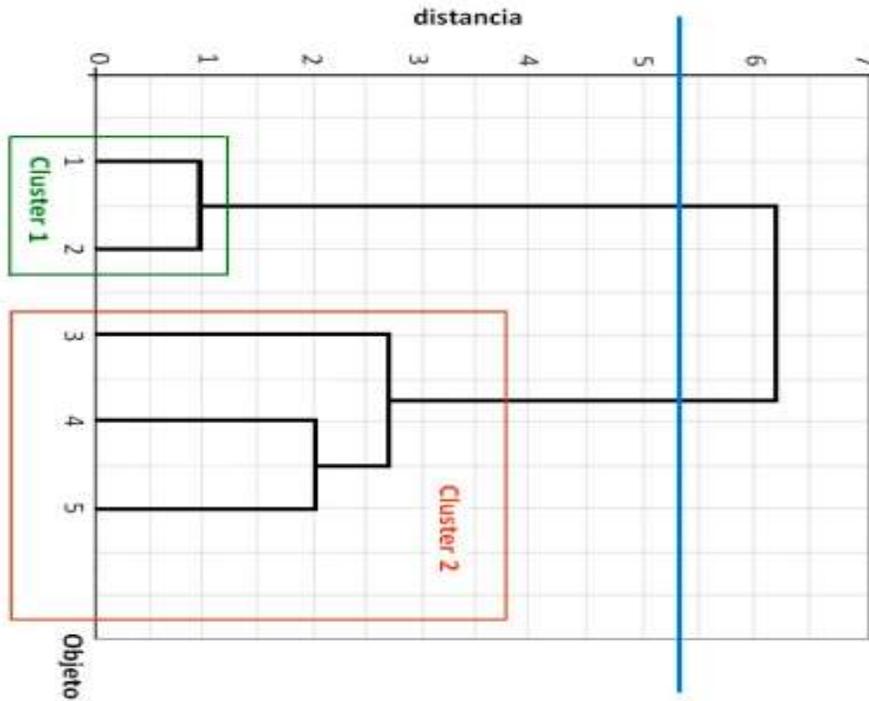


Ilustración 5.- Ejemplo de dendograma con 2 grupos o clústers.

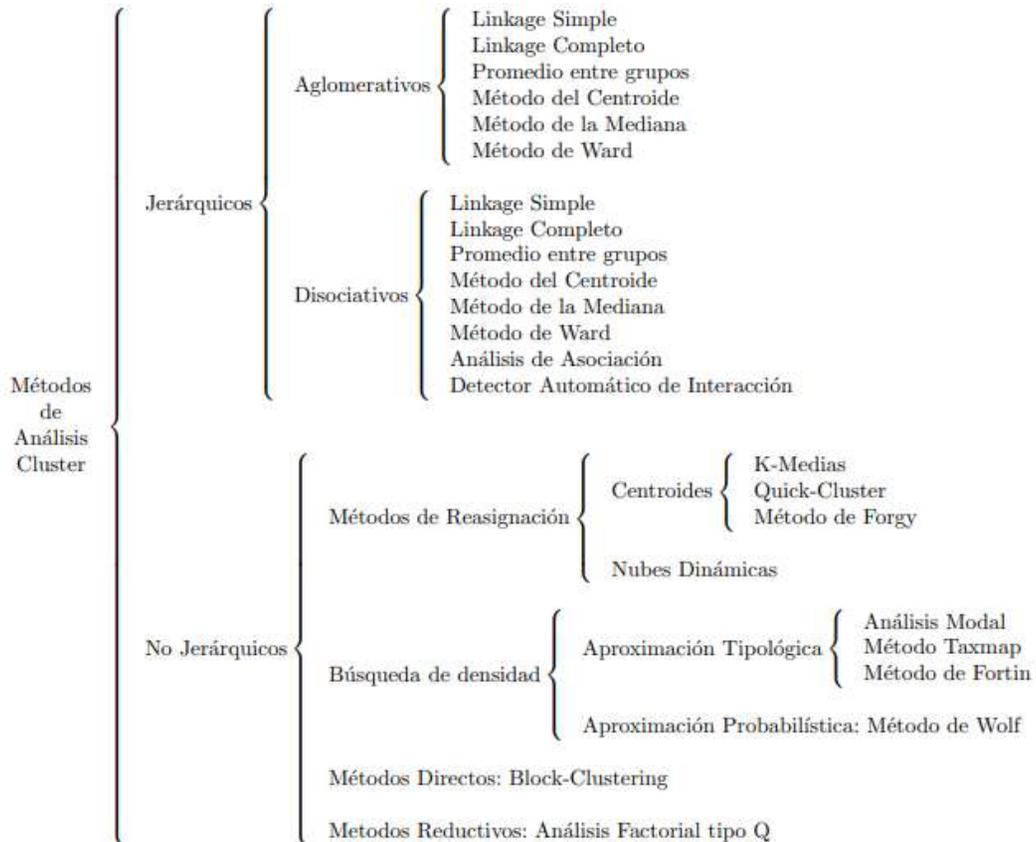


Ilustración 6.- Métodos de análisis clúster y su agrupación.

En este caso se busca agrupar las cuencas para poder transferir los parámetros calibrados del modelo entre cuencas que debido a sus características pertenecen al mismo grupo, para la generación de dichos grupos se optó por el método Jerárquico aglomerativo, debido a que no se conoce el número de grupos con los que se contará al finalizar las calibraciones, así como los elementos del mismo grupo a los que se trasladarán los parámetros.

Entre los métodos disponibles en este caso se aplica el método de Ward debido a que permite por medio de una función objetivo la formación de grupos con el menor error en la suma de medida de asociación Ecuación (Ec. 47).

$$E_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_{ij}^k - m_j^k)^2 \quad (\text{Ec. 47})$$

Donde:

E_k es el error de asociación en el Grupo K

x_{ij}^k es el valor de la j variable del i individuo para el K grupo

Y m_j^k es el centroide del grupo k para la variable j

4. Revisión de resultados

Una desventaja de esta metodología es que no cuenta con bases estadísticas por lo que una vez concluido el proceso se requiere un análisis por parte del investigador para verificar y dar sentido a los resultados obtenidos, esto es principalmente caracterizar cada uno de los grupos obtenidos.

Modelación del Sistema Subterráneo

Los acuíferos o agua subterránea es una parte que integra del sistema de recursos hídricos, que erróneamente es considerado separado de éste. Es por esto que una mejor optimización del sistema es una modelación conjunta del sistema superficial y subterráneo.

El propósito de esta etapa es realizar una modelación del flujo subterráneo. Para dicha modelación se conocen distintos métodos que se pueden dividir en dos grupos:

- Modelos Englobados.
- Modelos Distribuidos.

En los métodos englobados no se considera la geometría del acuífero y como su nombre lo indica todos sus parámetros están englobados en un solo grupo de parámetros, es decir se supone que el acuífero es uniforme en todas direcciones. Entre estos modelos podemos encontrar los siguientes:

- **Depósito:** es el modelo más sencillo y como su nombre lo indica supone al acuífero simplemente como un depósito sin considerar ninguna característica propia de este. En el modelo el volumen total del acuífero (V_t) es igual al volumen anterior que existía en el acuífero (V_{t-1}) más la recarga natural (R_{nat}), más la recarga artificial (R_{art}), en esta última se consideran tanto positivas como negativas si es que se extrae agua. Este modelo solo nos sirve para el balance hidrológico ya que lo único que nos indica es el volumen de agua en el acuífero. Por lo antes expuesto este modelo no nos permite considerar la interacción del acuífero con otros cuerpos de agua como pueden ser lagos, ríos o lagunas.
- **Modelo Unicelular:** Este modelo nos permite incorporar un parámetro a la ecuación (α) que considera la facilidad con la que fluye el agua en el acuífero, también el modelo permite determinar la relación río-acuífero, esto permite hacer la modelación sobreponiendo distintos elementos en el acuífero. La fórmula que representa a este modelo es la Ecuación (Ec. 48).

$$V_n = V_{n-1}e^{-\alpha t} + \frac{R_n}{\alpha} + (1 - e^{-\alpha t}) \quad (\text{Ec. 48})$$

- **Modelo Pluricelular englobado:** este modelo lo que hace es dividir el acuífero en varios modelos unicelulares cada uno con su parámetro y característica lo que permite tener un modelo. La fórmula que representa este modelo solo incorpora una suma de todos los elementos unicelulares que conforman el modelo pluricelular por medio de la Ecuación (Ec. 49).

$$V_n = \sum_{i=0}^{\infty} V_{n-1}e^{-\alpha t} + Q \sum_{i=0}^{\infty} \frac{b_n}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (\text{Ec. 49})$$

Por otra parte, los modelos distribuidos a diferencia de los modelos englobados sí consideran las características físicas de la cuenca, así como realizan una distribución espacial de los parámetros, es decir, son modelos mucho más completos que los modelos englobados.

Solución de modelos de autovalores

Los modelos distribuidos que se resuelven por métodos de elementos finitos o diferencias finitas tienen como desventaja un elevado costo computacional al ser modelos tan finos.

Para simplificar la solución de las ecuaciones en modelos distribuidos se puede aplicar el método de autovalores, este método permite reducir significativamente el costo computacional al discretizar las variables espaciales y mantener la precisión en los resultados temporales (Sahuquillo, 1983).

La fórmula que nos permite realizar esta simplificación es la mostrada en la ecuación (Ec. 50).

$$T * H + Q = SF \frac{\Delta H}{\Delta T} \quad (\text{Ec. 50})$$

Donde:

- T es una matriz simétrica que depende de la discretización hecha en el acuífero y la transmisividad.
- H es un vector de alturas piezométricas.
- Q es un vector de flujo exterior al acuífero.
- SF es la matriz diagonal que depende de la discretización del acuífero, las condiciones de contorno y el coeficiente de almacenamiento.

Para la simplificación por el método de autovalores se considera que T y SF son constantes e independientes de H, de tal forma que el vector de alturas piezométricas se calcula con la Ecuación (Ec. 51)

$$H_k = U + A * E * A^T * SF * (H_{k-1} - U) + A * |I - E| * |\alpha|^{-1} * A^T * Q \quad (\text{Ec. 51})$$

Donde:

- K es el periodo analizado.
- U es el vector de alturas piezométricas para régimen estacionario y Q=0.
- A y $|\alpha|$ son la matriz de autovalores.
- E es la matriz diagonal que se calcula con la Ecuación (EC. 52)

$$E_{(i,j)} = \exp^{-\alpha_i \Delta t} \quad (\text{EC. 52})$$

Modelo de Gestión Hídrica:

Para realizar este modelo de gestión una vez determinada la disponibilidad por medio de la modelación superficial y subterránea, se determinan las demandas del sistema y la infraestructura hidráulica con la que se cuenta; se utiliza un algoritmo de optimización el cual consiste en minimizar una suma matemática de todos los elementos en el sistema de recursos hídricos de tal manera que se satisfagan todas las necesidades o en su mayoría con el recurso disponible.

El principal elemento de análisis en este modelo son los embalses o presas y se analiza por un balance de agua en la presa por medio de la siguiente Ecuación (Ec. 53).

$$Vf = Vi + A - Pf - E - Sv - Sc \quad (\text{Ec. 53})$$

Donde:

- V_f es el volumen final del embalse.
- A es la aportación recibida.
- P_f es la pérdida por infiltración.
- E es la pérdida por evaporación.
- S_v los vertidos por exceso en el nivel del envase.
- S_c es el agua soltada de forma controlada por el envase.

Es este último elemento del balance el que nos permite gestionar el recurso disponible, de tal forma que si existe una sequía operativa o fallo en el sistema nos permite manipular el agua soltada para distribuir el fallo de tal forma que tenga un impacto mínimo en un extenso periodo de tiempo en lugar de tener un fallo importante en un instante definido de tiempo.

El modelo de gestión nos permite evaluar y proponer reglas actuales en el sistema e identificar en caso de que exista incumplimiento de las demandas los puntos con mayor riesgo.

Generación de series sintéticas de caudales:

La generación de series sintéticas se trata de un proceso estocástico que tiene por objetivo generar series de datos temporales que son estadísticamente indistinguibles o iguales a la serie histórica original, es decir tiene la misma probabilidad de ocurrencia que la serie histórica, por lo tanto, pueden ser utilizados para representar el comportamiento más probable que tendrá la serie histórica en el futuro.

Para la generación de estas series sintéticas se usa una modelación periódica estocástica, en este caso mensual por medio de autorregresivos y autorregresivos de media móvil (AR y ARMA).

Estos modelos se determinan con la Ecuación (Ec. 54)

(Ec. 54)

$$\{z\}_t = [\Phi]_1\{z\}_{t-1} + [\Phi]_2\{z\}_{t-2} + \dots + [\Phi]_p\{z\}_{t-p} + [\Theta]_0\{\varepsilon\}_t - [\Theta]_{01}\{\varepsilon\}_{t-1} - \dots - [\Theta]_q\{\varepsilon\}_{t-q}$$

Donde:

- $\{z\}_t$ es el vector de caudales para el periodo de cálculo.
- $[\Phi]_p$ es la matriz de autorregresivos.
- $[\Theta]_q$ es la matriz de parámetros de media móvil.
- $\{\varepsilon\}_t$ es el vector de residuos o ruidos de la serie histórica.

Cabe aclarar que las series sintéticas no generan una predicción de una serie futura, sino una serie que probablemente ocurra en un futuro, bajo esta premisa una serie sintética no nos representa nada, por lo que se requiere una gran cantidad de series sintéticas para hablar de escenarios probables. Se han realizado investigaciones que indican que se requiere un mínimo de 1,000 series sintéticas para representar la probabilidad de ocurrencia de un evento (Sánchez, 1999).

El modelo autorregresivo puro o AR(p) es el más simple, además de que son los más utilizados en hidrología debido a su tipo de dependencia temporal, son intuitivos y sencillos. Dichos modelos pueden definirse por parámetros constantes, periódicos o una combinación entre ambos, y pueden expresarse con la Ecuación (Ec. 55).

$$z_t = \sum_{j=1}^p \phi_j z_{t-j} + \varepsilon_t \quad (\text{Ec. 55})$$

Donde ϕ_j $j=1, \dots, p$ son los denominados coeficientes autorregresivos y ε_t es el ruido de la función, el cual se define con una serie temporal independiente con distribución normal, con media nula y desviación típica conocida.

Adicional a los parámetros del modelo es importante considerar la correlación existente entre las distintas aportaciones en la zona de estudio, ya que estas tienden a correlacionarse entre sí y esta característica es un elemento importante a considerar, lo que hace necesario realizar una modelación multivariada.

Para realizar este cometido puede emplearse la desagregación espacial de Lane, el cual es específicamente idóneo para problemas multivariados donde se cuenta con una gran cantidad de series de datos o una gran cantidad de parámetros en los mismos.

Este es un modelo que nos permite generar series de datos secundarias a partir de una serie de datos principal en base a la (Ec. 56).

$$\{Y\}_t = [A]\{X\}_t + [B]\{\varepsilon\}_t + [C]\{Y\}_{t-1} \quad (\text{Ec. 56})$$

Donde:

Y es el Vector de datos de las estaciones secundarias.

X es el vector de datos de la estación principal.

A, B y C son las matrices de parámetros.

ε es el ruido blanco, el cual está conformado por valores aleatorios de media cero, desviación típica unitaria e independientes en el tiempo.

Combinado con el modelo autorregresivo a emplear permite generar series sintéticas que preserven la media y varianzas de las series históricas, así como la correlación existente entre la serie principal y las secundarias.

Modelo de Gestión de Sequía Operativa:

El modelo de gestión de sequías se traduce en un modelo que nos define el riesgo de la gestión, es decir la probabilidad de que bajo ciertas condiciones de gestión se genere un fallo en la satisfacción de las necesidades del sistema de recursos hídricos o sequía operativa, esto se realiza con ayuda del modelo de gestión y la serie de datos sintéticos; este conjunto nos permite determinar la probabilidad de ocurrencia de sequía operativa en función de las reglas de operación que se propongan. El análisis permite determinar que RO ofrece una menor probabilidad de que ocurra una sequía operativa en el sistema de recursos hídricos.

RESULTADOS OBTENIDOS

Lo primero es determinar el software que se empleará para la realización de los modelos necesarios. En este caso se optó por usar el software AQUATOOL desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia, debido a que dicho software incorpora una serie de módulos que permite realizar modelación conjunta de distintas condiciones de un sistema de recursos hídricos.

Entre los módulos y programas externos se emplearon:

- EvalHID (incorporado en Aquatool) para la modelación superficial.
- Aquival (como herramienta externa y posterior incorporación en Aquatool) para la modelación subterránea.
- SimGes (incorporado en Aquatool) para la modelación de la gestión incorporando la modelación superficial y subterránea.
- MashWin (como herramienta externa) para la elección del modelo y determinación de parámetros de las series sintéticas.
- SimRisk (incorporado en Aquatool) para el modelo de gestión de sequía operativa incorporando el modelo de gestión y parámetros de las series sintéticas.

Análisis de la zona de estudio

La cuenca del río Duero se encuentra localizada en la región hidrológica RH12 Lerma-Santiago específicamente en la zona Hidrológica Lerma-Chapala. La cuenca del río Duero se encuentra en Michoacán de Ocampo en frontera con Guanajuato delimitada por las coordenadas 19°40' y 20°15' latitud norte y, 101°45' y 102°45' longitud oeste a una altitud media de 2,000 msnm y cuenta con una superficie de 2531.3 km²; esta superficie abarca los municipios de Chavinda, Tangamandapio, Cheran, Chilchota, Tlazazalca, Jacona, Zamora y Purépero, Ilustración 7.

El río Duero, que anteriormente desembocaba en el lago de Chapala, fue desviado hacia el río Lerma debido a la desecación de la parte oriental del lago con fines de uso agrícola, por lo cual toman agua para este fin los distritos DR061 Zamora y DR024 Ciénega de Chapala.

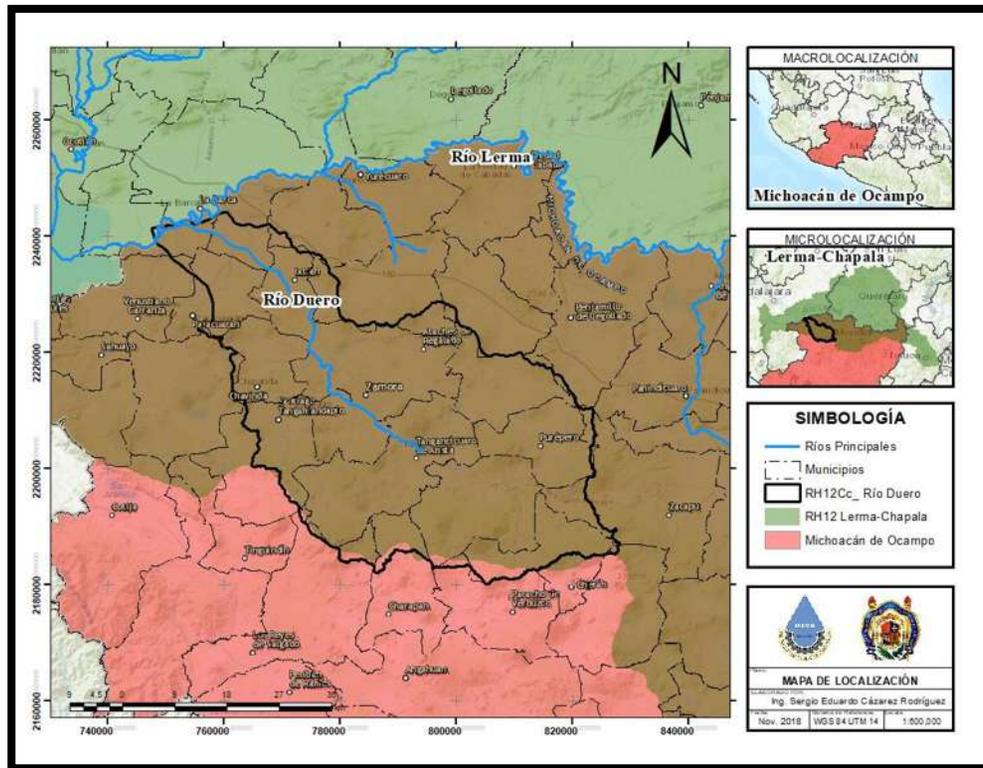


Ilustración 7.- Mapa de localización de la cuenca en estudio.

La superficie de aportación de la cuenca es de 2,198km² representando el 3.75% de la superficie del estado de Michoacán y se estima cuenta con un escurrimiento natural de 457.8 hm³/año (CONAGUA, 2009).

Por otra parte, la cuenca cuenta con 52 manantiales, de estos 49 fueron aforados en 2013 permitiendo determinar un aporte de 268.9 hm³ hm³/año (Silva *et al.*, 2013).

Características físicas

Primeramente es necesario identificar las características físicas de la zona en estudio, esto se realizó mediante la recolección de información disponible en las plataformas en línea INEGI y el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL). Como resultado de este proceso fue posible identificar y caracterizar la topografía (Ilustración 8) e hidrografía (Ilustración 9).

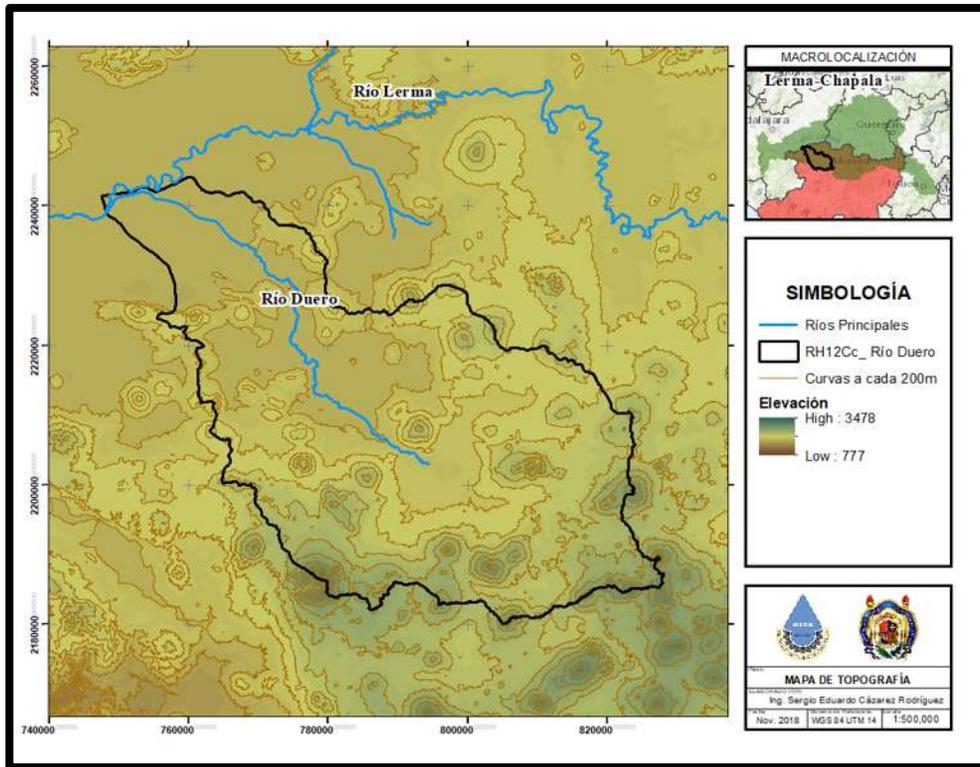


Ilustración 8.- Mapa topográfico de la cuenca del río Duero.

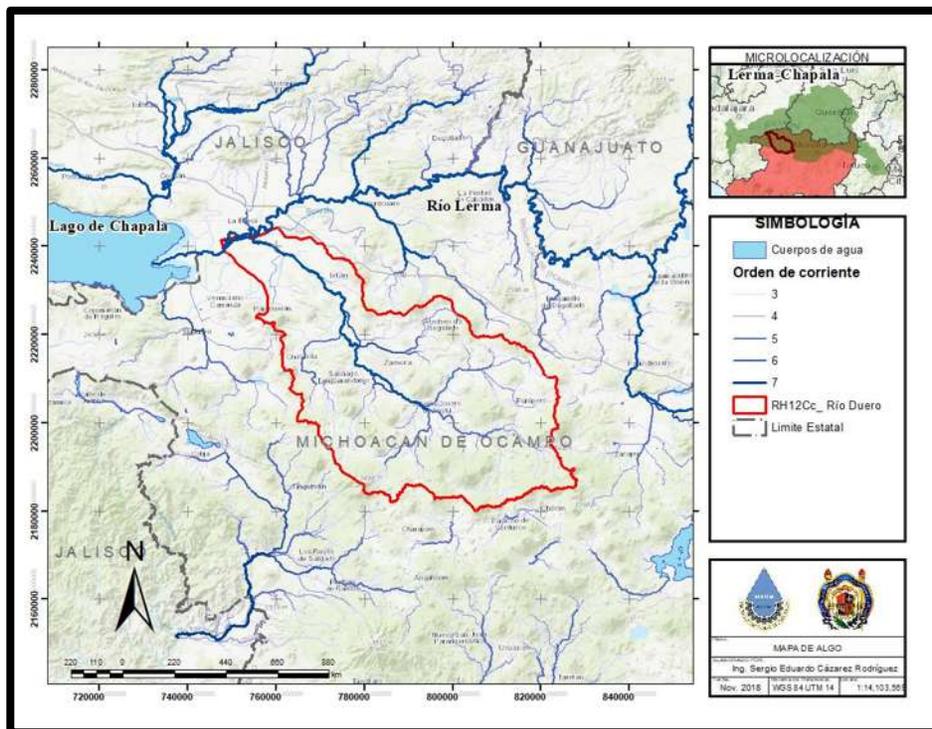


Ilustración 9.- Mapa hidrográfico de la cuenca del río Duero.

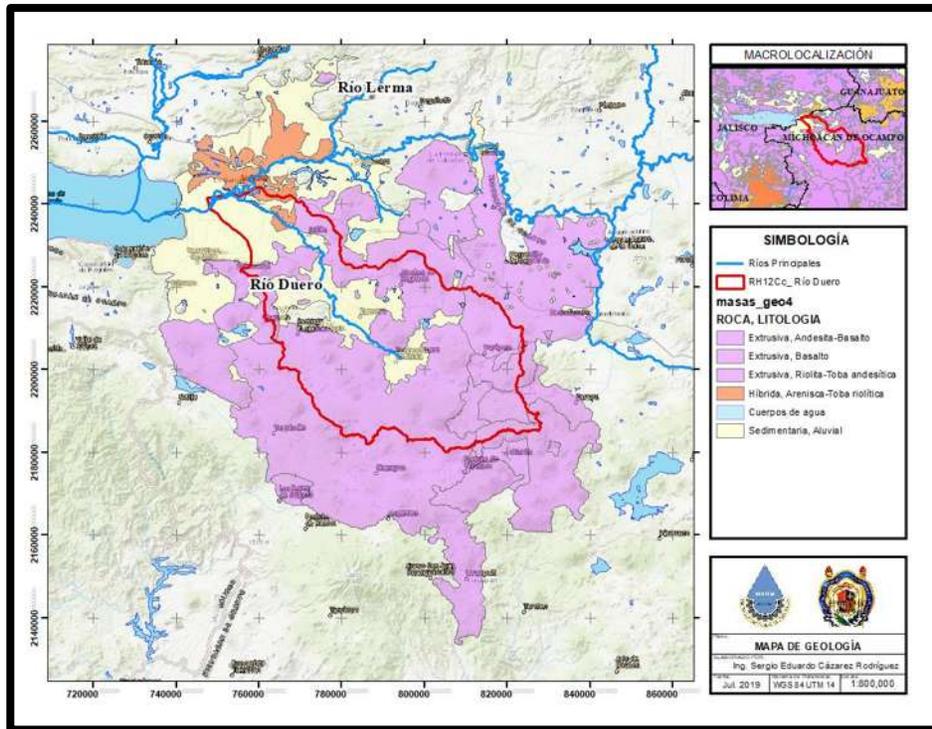


Ilustración 10.- Mapa geológico en la cuenca del río Duero.

Por otra parte para determinar las características del uso de suelo, textura del suelo y geología se hace uso de la información disponible en sitios web correspondientes a la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y el Servicio Geológico Mexicano (SGM), determinando de esta manera la geología de la zona de estudio (Ilustración 10), el uso de suelo (Ilustración 11) y textura del suelo (Ilustración 12).

También es importante considerar los acuíferos homologados en la zona ya que la información se encuentra limitada por los mismos. Para esto se utiliza información de CONAGUA por medio de la actualización de la disponibilidad media anual para los distintos acuíferos publicados en el diario oficial de la federación el 20 de abril del 2005.

Una vez identificados los acuíferos relacionados a la zona de estudio es posible obtener las concesiones de agua existentes para cada acuífero por medio de la página web del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA).

Como resultado de estas consultas se muestra en la Ilustración 13 los acuíferos La Barca, Pénjamo-Abasolo, Briseñas-Yurécuaro, La Piedad, Pastor Ortiz-La Piedad, Ciénegas de Chapala, Zamora, Zacapu, Cotija, Uruapan, Lagunillas-Pátzcuaro, y Nueva Italia, así como su dirección de flujo y las 5,454 concesiones correspondientes a estos acuíferos.

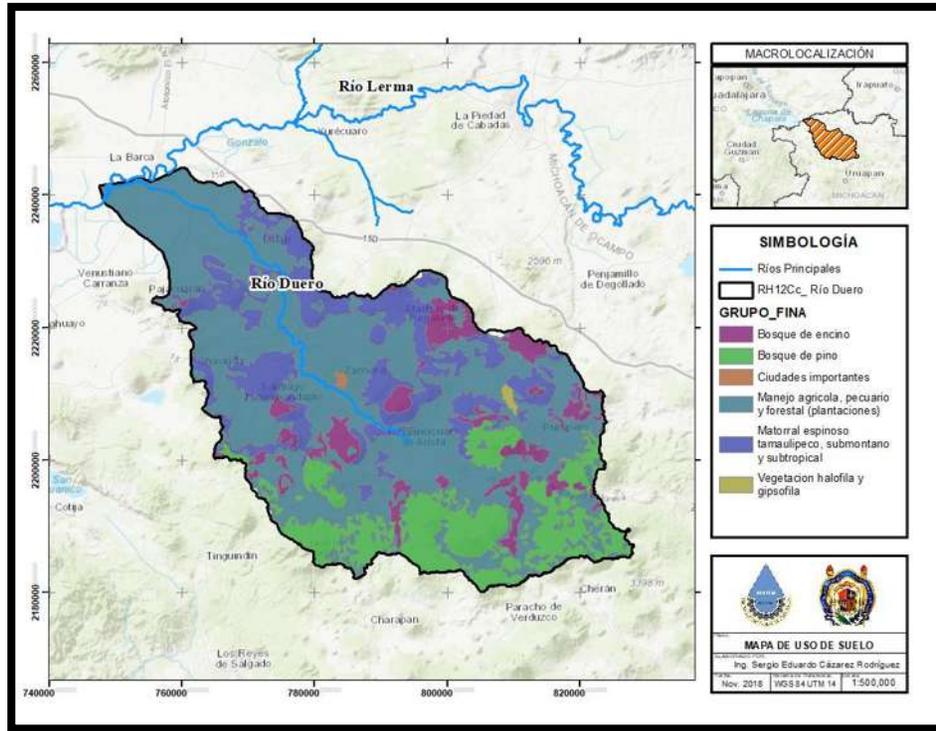


Ilustración 11.- Mapa del uso de suelo y vegetación en la cuenca del río Duero.

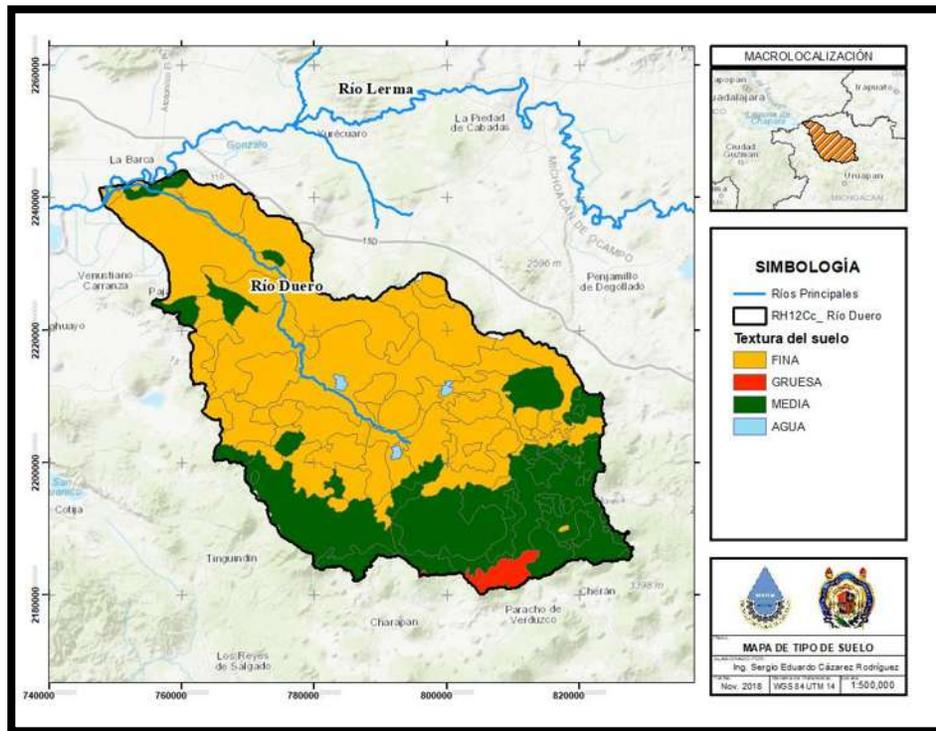


Ilustración 12 Mapa de textura del suelo de la cuenca del río Duero.

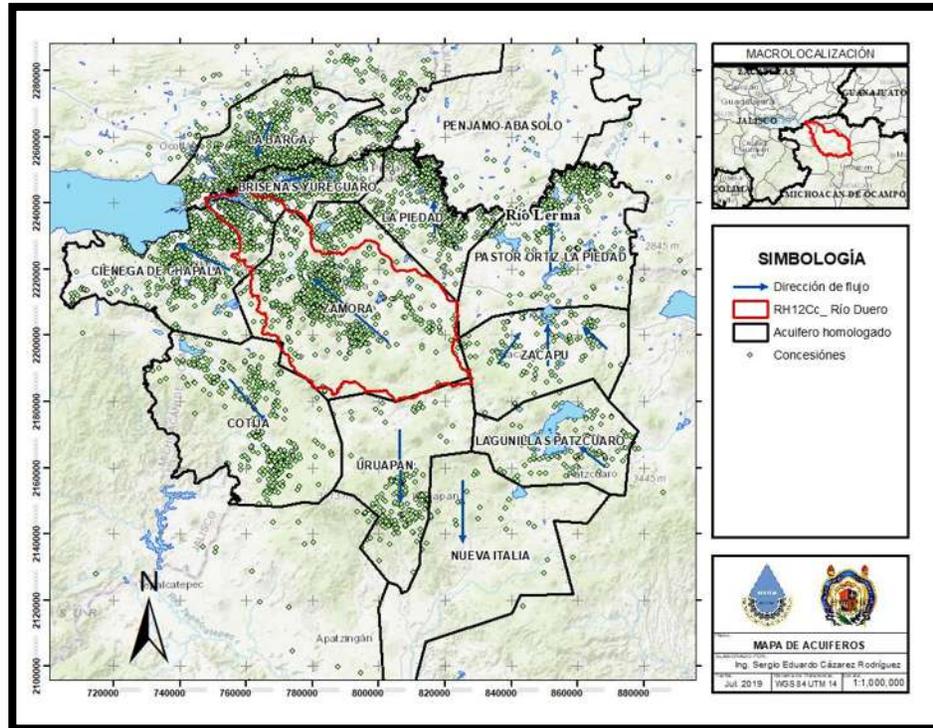


Ilustración 13.- Mapa de Acuíferos, dirección de flujo subterráneo y pozos concesionados.

Caracterización de las demandas del sistema

Demandas agrícolas

La principal demanda de agua con la que se cuenta en la cuenca es la agrícola dividida en distritos de riego, para este caso el DR061 ocupa el 3er lugar en demanda de agua dentro de la cuenca Lerma-Chapala con un volumen bruto demandado promedio de 228 hm³/año y cuenta con una eficiencia global del 33.4%, representando el 13% de la producción económica de la cuenca Lerma-Chapala.

Este DR se encuentra dividido en 4 módulos como se muestra en la Ilustración 14, los cuales son abastecidos de agua por derivación del río, presa o pozos. La distribución de dichas dotaciones son las mostradas en la Ilustración 15 e Ilustración 16, esta información es generada a partir de la información promedio proporcionada por las oficinas del DR061 para el periodo 2013-2019.

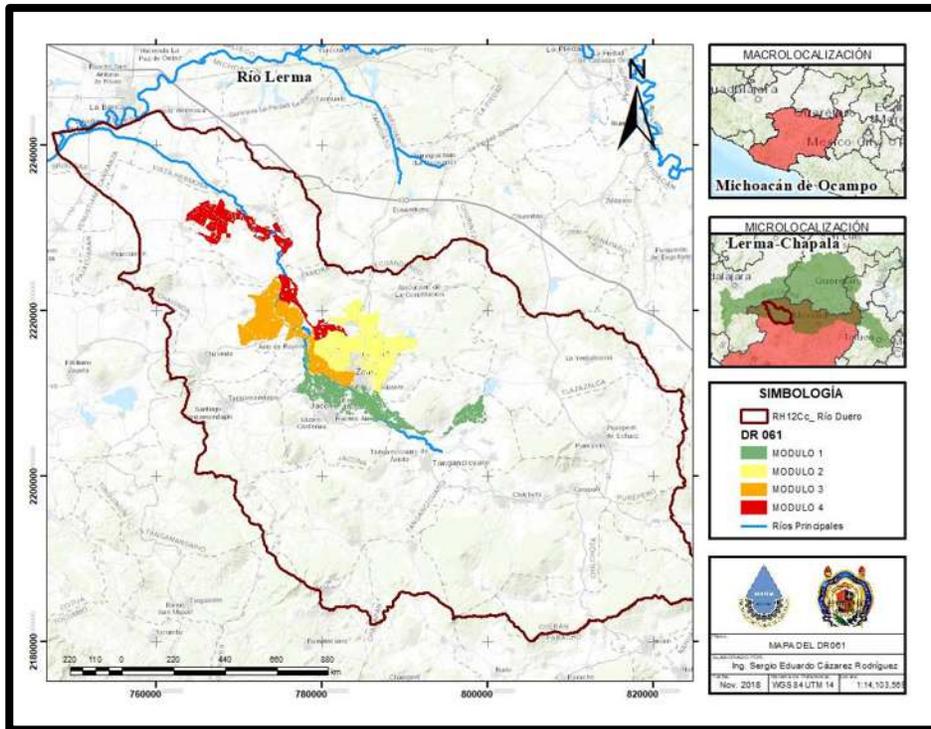


Ilustración 14.-Mapa de ubicación de los módulos de riego del DR061.

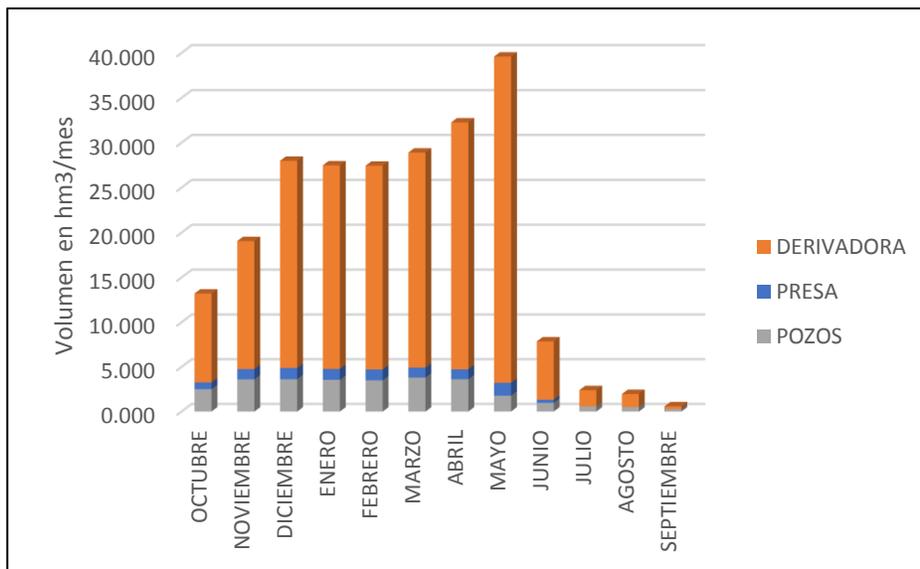


Ilustración 15.- Distribución temporal de la dotación para el DR061.

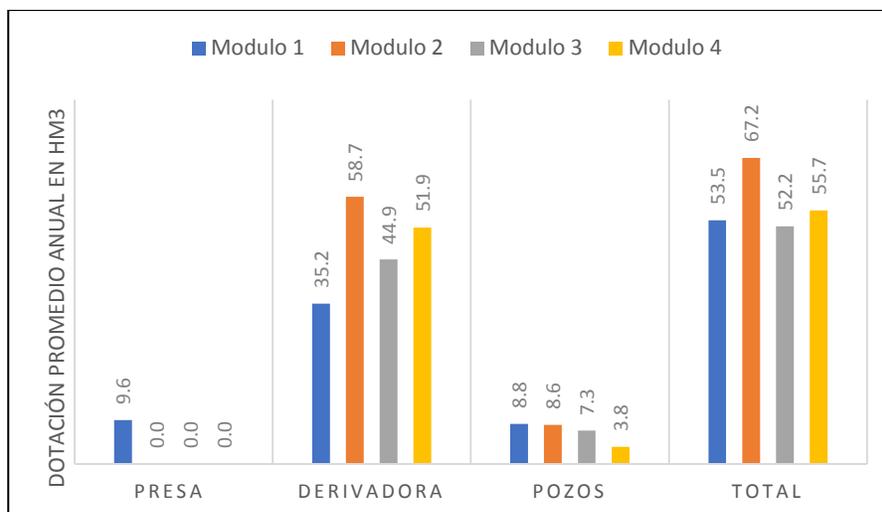


Ilustración 16.-Distribución por modulo y origen de la dotación para el DR061

Demandas Urbanas

Las demandas urbanas son entre todas las demandas las de mayor importancia, y para cuantificar es necesario determinar la población en la zona de estudio. Con el objetivo de simplificar dicho procedimiento se agruparon las localidades por municipios; para determinar el registro de población histórico se tomó la información de los censos y conteos por parte de INEGI obteniendo como resultado las poblaciones mostradas en la Tabla 8.

Tabla 8.- Registro histórico de población obtenido de la base de datos de INEGI.

Nombre del municipio	Clave	Registro Histórico								
		1950	1960	1970	1980	1990	1995	2000	2005	2010
Zamora	108	37,676	53,968	82,943	113,474	144,899	160,079	161,918	170,748	184,197
Tangancícuaro	85	18,838	25,257	29,528	30,947	33,835	33,815	32,821	30,052	32,884
Cherán	24	5,049	7,267	10,239	13,267	14,870	20,786	21,706	18,156	18,230
Chilchota	25	9,739	13,866	17,363	17,620	26,349	24,810	23,221	19,478	21,515
Purépero	70	9,542	11,744	12,826	16,133	14,674	88,581	84,946	16,523	16,837
Tangamandapio	84	9,409	12,559	14,396	16,503	21,261	22,151	26,245	24,267	27,018
Jacona	43	9,496	14,245	26,078	35,247	40,546	14,959	14,393	60,029	62,413
Tlazazalca	94	7,607	10,145	11,579	11,735	12,173	9,294	8,830	6,776	7,296
Chavinda	23	7,549	10,948	12,197	12,354	12,472	13,369	13,974	11,632	13,711
Ixtlán	42	11,125	12,662	13,897	14,870	15,510	12,591	13,260	12,794	13,606
Pajacuarán	62	12,674	15,686	17,493	20,206	19,678	17,161	18,804	7,722	9,141
Briseñas de Matamoros	11		7,746	7,454	8,487	9,478	9,831	9,641	9,560	11,754
Vista Hermosa	105	16,884	14,277	14,329	15,527	18,209	18,651	17,687	17,412	18,912
totales		155,588	210,370	270,322	326,370	383,954	446,078	447,446	405,149	437,514

Reglas de operación

Para este caso lo principal es conocer las reglas de operación que se aplican actualmente en la cuenca para el caso de las demandas agrícolas. El proceso para definir los suministros de agua en el caso de la cuenca Lerma-Chapala se establece en el anexo 5 de la Ley de Aguas Nacionales titulado “El proceso para definir los suministros de agua en el caso de la cuenca Lerma-Chapala se establece en el convenio para la aplicación del programa sobre la disponibilidad, distribución y usos de las aguas superficiales de propiedad nacional del área geográfica Lerma-Chapala” publicado el 14 de diciembre del 2004, en el cual el procedimiento se divide en las siguientes fases:

- Primera.- Determinación del escurrimiento generado por cuenca.
- Segunda.- Determinación de volúmenes máximos de extracción.
- Tercera.- Determinación de volúmenes autorizados.
- Cuarta.- Ajustar los volúmenes autorizados.
- Quinta.- Presentación ante el Grupo de Seguimiento y Evaluación del Consejo de Cuenca.
- Sexta.- Seguimiento y Evaluación.

Este convenio establece los volúmenes autorizados para cada distrito de riego, en el caso de la zona de estudio se tienen 2 distritos de riego que son el 061 Zamora y 024 ciénegas de Chapala y sus reglas de operación para la determinación de los volúmenes máximos de extracción se establecen a continuación.

Distrito de Riego 061 Zamora:

El volumen máximo de extracción para el caso del Distrito de Riego 061 será el resultado de la aplicación de una de las siguientes ecuaciones matemáticas con base en el almacenamiento que presente el lago de Chapala al 1 de noviembre:

- a) Si el volumen del Lago de Chapala, el uno de noviembre, es menor a $3,300 \text{ hm}^3$:

Cuando la magnitud de la suma de los escurrimientos generados en las cuencas río Lerma 1 (Alzate), río La Gavia (Ramírez), río Jaltepec (Tepetitlán), Lerma 2 (Tepuxtepec), Lerma 3 (Solís), río La Laja 1 (Begoña), río Querétaro (Ameche), río La Laja 2 (Pericos), laguna de Yuriria, río Lerma 4 (Salamanca), río Turbio (Adjuntas), río Angulo, río Lerma 5 (Corrales), río Lerma 6 (Yurécuaro), río Duero, río Zula y río Lerma 7 (Chapala) del periodo antecedente se ubique entre 0 y $2,211.00 \text{ hm}^3$, el volumen máximo de extracción será igual a 51.3 hm^3 . Cuando este escurrimiento sea mayor a $2,211.00$ y menor o igual $3,530.19 \text{ hm}^3$, el volumen máximo de extracción será igual al 7.0534% de la suma del escurrimiento generado en las cuencas menos 104.65 hm^3 . Finalmente, cuando la suma de los escurrimientos generados en las cuencas sea

mayor a los 3,530.19 hm³, el volumen máximo de extracción será igual a 144.35 hm³.

- b) Si el volumen del Lago de Chapala, el uno de noviembre, se encuentra entre 3,300 y 6,000 hm³:

Cuando la magnitud de la suma de los escurrimientos generados en las cuencas río Lerma 1 (Alzate), río La Gavia (Ramírez), río Jaltepec (Tepetitlán), Lerma 2 (Tepuxtepec), Lerma 3 (Solís), río La Laja 1 (Begoña), río Querétaro (Ameche), río La Laja 2 (Pericos), laguna de Yuriria, río Lerma 4 (Salamanca), río Turbio (Adjuntas), río Angulo, río Lerma 5 (Corrales), río Lerma 6 (Yurécuaro), río Duero, río Zula y río Lerma 7 (Chapala) del periodo antecedente se ubique entre 0 y 2,211.00 hm³, el volumen máximo de extracción será igual a 101.96 hm³. Cuando este escurrimiento sea mayor a 2,211.00 y menor o igual 3,530.19 hm³, el volumen máximo de extracción será igual al 7.0534% de la suma del escurrimiento generado en las cuencas menos 54.0 hm³. Finalmente, cuando la suma de los escurrimientos generados en las cuencas sea mayor a los 3,530.19 hm³, el volumen máximo de extracción será igual a 195.0 hm³.

- c) Si el volumen del Lago de Chapala, el uno de noviembre, es mayor a 6,000 hm³:

Cuando la magnitud de la suma de los escurrimientos generados en las cuencas río Lerma 1 (Alzate), río La Gavia (Ramírez), río Jaltepec (Tepetitlán), Lerma 2 (Tepuxtepec), Lerma 3 (Solís), río La Laja 1 (Begoña), río Querétaro (Ameche), río La Laja 2 (Pericos), laguna de Yuriria, río Lerma 4 (Salamanca), río Turbio (Adjuntas), río Angulo, río Lerma 5 (Corrales), río Lerma 6 (Yurécuaro), río Duero, río Zula y río Lerma 7 (Chapala) del periodo antecedente se ubique entre 0 y 2,211.00 hm³, el volumen máximo de extracción será igual a 106.91 hm³. Cuando este escurrimiento sea mayor a 2,211.00 y menor o igual 3530.19 hm³, el volumen máximo de extracción será igual al 7.0563% de la suma del escurrimiento generado en las cuencas menos 49.10 hm³. Finalmente, cuando la suma de los escurrimientos generados en las cuencas sea mayor a los 3,530.19 hm³, el volumen máximo de extracción será igual a 200 hm³.

En la gráfica de la Ilustración 17 se muestra el comportamiento de las reglas de operación de manera gráfica para mayor entendimiento.

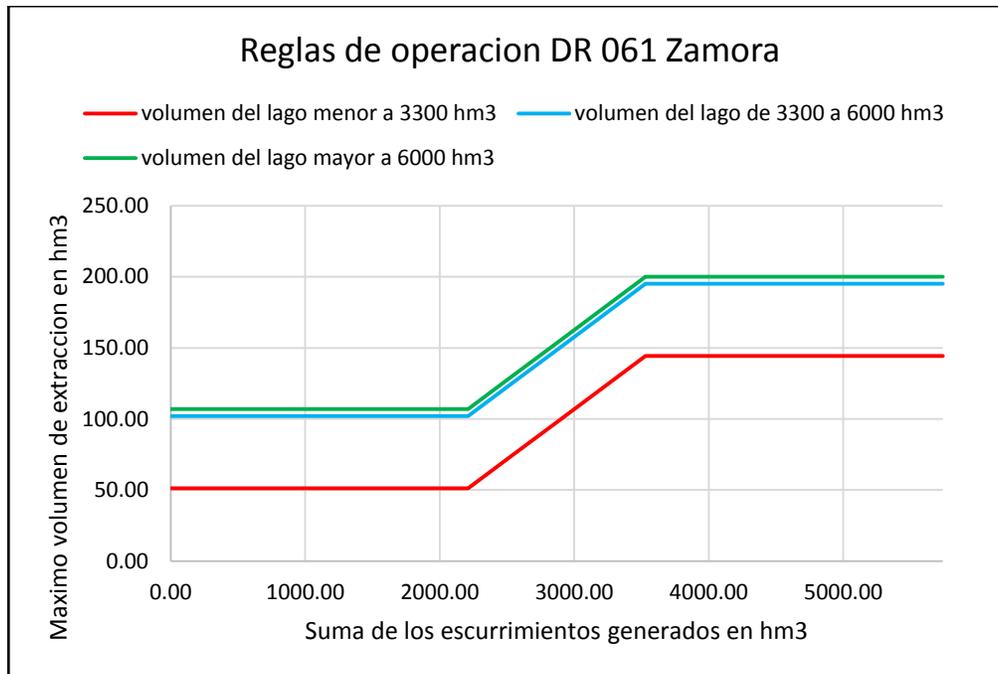


Ilustración 17.- Gráfica de las reglas de operación establecidas para el DR 061 Zamora.

Distrito de Riego 024 Ciénega de Chapala:

El volumen máximo de extracción para el caso del Distrito de Riego 024 será el resultado de la aplicación de una de las siguientes ecuaciones matemáticas de acuerdo al almacenamiento que presente el lago de Chapala al 1 de noviembre:

- a) Si el volumen del Lago de Chapala, el uno de noviembre, es menor a $3,300 \text{ hm}^3$:

Cuando la magnitud de la suma de los escurrimientos generados en las cuencas río Lerma 1 (Alzate), río La Gavia (Ramírez), río Jaltepec (Tepetitlán), Lerma 2 (Tepuxtepec), Lerma 3 (Solís), río La Laja 1 (Begoña), río Querétaro (Ameche), río La Laja 2 (Pericos), laguna de Yuriria, río Lerma 4 (Salamanca), río Turbio (Adjuntas), río Angulo, río Lerma 5 (Corrales), río Lerma 6 (Yurécuaro), río Duero, río Zula y río Lerma 7 (Chapala) del periodo antecedente se ubique entre 0 y $2,211.00 \text{ hm}^3$, el volumen máximo de extracción será igual a 43.60 hm^3 . Cuando este escurrimiento sea mayor a $2,211.00$ y menor o igual $3,530.19 \text{ hm}^3$, el volumen máximo de extracción será igual al 5.9954% de la suma del escurrimiento generado en las cuencas menos 88.96 hm^3 . Finalmente, cuando la suma de los escurrimientos generados en las cuencas sea mayor a los $3,530.19 \text{ hm}^3$, el volumen máximo de extracción será igual a 122.69 hm^3 .

- b) Si el volumen del Lago de Chapala, el uno de noviembre, se encuentre entre 3,300 y 6,000 hm³:

Cuando la magnitud de la suma de los escurrimientos generados en las cuencas río Lerma 1 (Alzate), río La Gavia (Ramírez), río Jaltepec (Tepetitlán), Lerma 2 (Tepuxtepec), Lerma 3 (Solís), río La Laja 1 (Begoña), río Querétaro (Ameche), río La Laja 2 (Pericos), laguna de Yuriria, río Lerma 4 (Salamanca), río Turbio (Adjuntas), río Angulo, río Lerma 5 (Corrales), río Lerma 6 (Yurécuaro), río Duero, río Zula y río Lerma 7 (Chapala) del periodo antecedente se ubique entre 0 y 2,211.00 hm³, el volumen máximo de extracción será igual a 75.09 hm³. Cuando este escurrimiento sea mayor a 2,211.00 y menor o igual 3,530.19 hm³, el volumen máximo de extracción será igual al 5.9954% de la suma del escurrimiento generado en las cuencas menos 57.46 hm³. Finalmente, cuando la suma de los escurrimientos generados en las cuencas sea mayor a los 3,530.19 hm³, el volumen máximo de extracción será igual a 154.19 hm³.

Si el volumen del Lago de Chapala, el uno de noviembre, es mayor a 6,000 hm³:

Cuando la magnitud de la suma de los escurrimientos generados en las cuencas río Lerma 1 (Alzate), río La Gavia (Ramírez), río Jaltepec (Tepetitlán), Lerma 2 (Tepuxtepec), Lerma 3 (Solís), río La Laja 1 (Begoña), río Querétaro (Ameche), río La Laja 2 (Pericos), laguna de Yuriria, río Lerma 4 (Salamanca), río Turbio (Adjuntas), río Angulo, río Lerma 5 (Corrales), río Lerma 6 (Yurécuaro), río Duero, río Zula y río Lerma 7 (Chapala) del periodo antecedente se ubique entre 0 y 2,211.00 hm³, el volumen máximo de extracción será igual a 90.88 hm³. Cuando este escurrimiento sea mayor a 2,211.00 y menor o igual 3530.19 hm³, el volumen máximo de extracción será igual al 5.9979% de la suma del escurrimiento generado en las cuencas menos 41.74 hm³. Finalmente, cuando la suma de los escurrimientos generados en las cuencas sea mayor a los 3,530.19 hm³, el volumen máximo de extracción será igual a 170 hm³.

En la gráfica de la Ilustración 18 se muestra el comportamiento de las reglas de operación para mayor entendimiento.

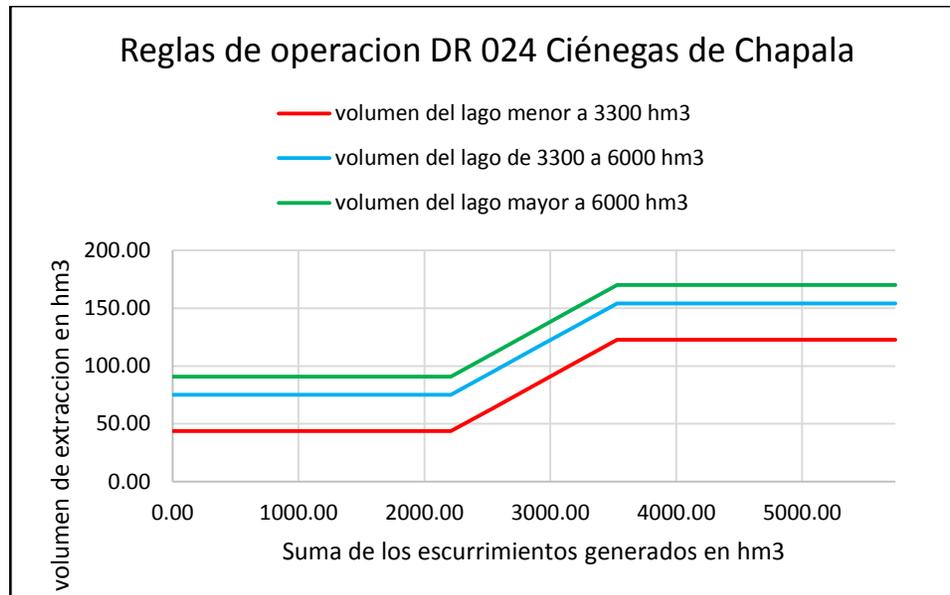


Ilustración 18.- Gráfica de las reglas de operación establecidas para el DR 024 Ciénegas de Chapala.

Como se puede observar las reglas de operación tienen como principal objetivo mantener el volumen del lago de Chapala, lo cual establece un primer límite de la cantidad de agua de la que se puede disponer, un segundo límite lo establece la cantidad de agua aportada por las cuencas en el periodo anterior, en este caso es el medido en la estación hidrométrica Yurécuaro.

Características climatológicas e hidrométricas

Un elemento esencial para el estudio planteado son los datos correspondientes a la climatología, por lo que fue necesario identificar las estaciones climatológicas en la zona de estudio, para esto se utilizó la información geográfica disponible en CONABIO para identificar mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG) las estaciones climatológicas dentro y en la proximidad de la cuenca del río Duero; como resultado se obtuvieron 116 estaciones en la proximidad de la zona de estudio. Una vez identificadas se utiliza la base de datos de CICECE (CLICOM) para descargar el registro histórico de precipitación y temperatura de las estaciones identificadas.

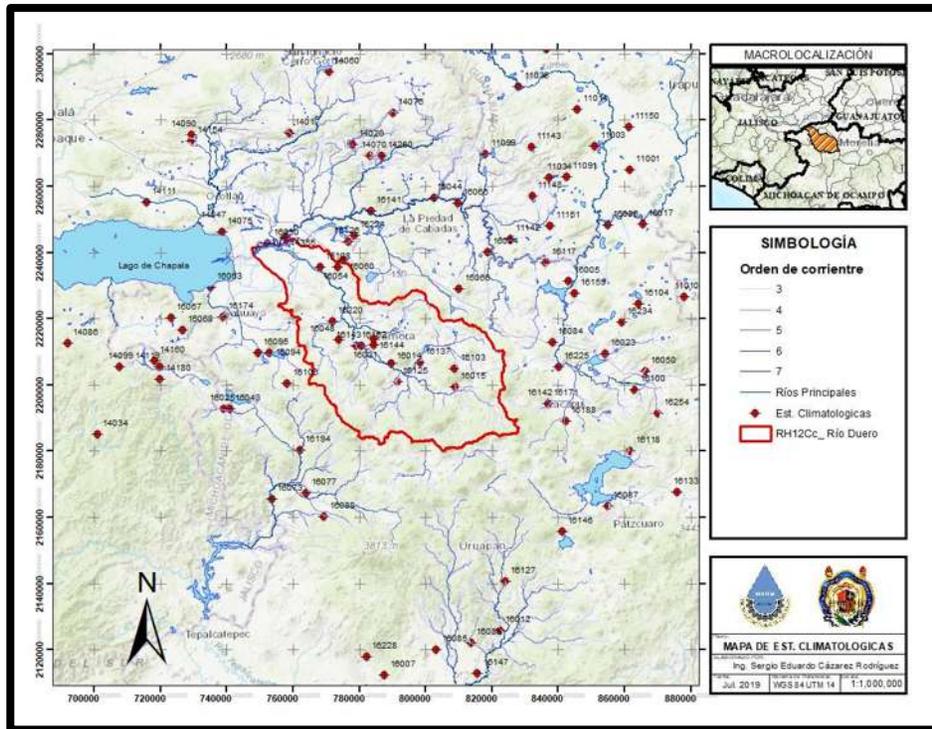


Ilustración 19.- Mapa de estaciones climatológicas en la proximidad de la cuenca en estudio.

En la Ilustración 20 se pueden observar las estaciones hidrométricas y presas disponibles en la zona de estudio, obtenidas de BANDAS, así como las que se seleccionaron para este estudio. Adicionalmente la Tabla 9 muestra sus características.

Tabla 9.- Características de las estaciones Hidrométricas y presas seleccionadas.

Clave	Nombre	longitud	latitud	Tipo	Periodo	años	años efectivos	
12533	UREPETIRO II	-102.80	20.72	Estación	1960	1999	40	28.33
12589	HUASCATO	-102.90	22.76	Estación	1964	2013	50	48.67
18530	LOS LIMONES	-100.52	18.13	Estación	1954	1995	42	40.50
18515	CUPATITZIO	-97.79	17.67	Estación	1972	2004	33	17.00
12379	JACONA	-99.52	19.28	Estación	1966	1999	34	30.50
315MAZ	PRESA MARIANO ABASOLO	-101.93	20.50	Presa	1937	2001	65	64.33
445URE	PRESA UREPETIRO	-102.13	19.97	Presa	1952	2001	50	47.42
180GUA	PRESA GUARACHA	-102.56	19.97	Presa	1940	1986	47	36.17
205JAR	PRESA JARIPO	-102.60	19.95	Presa	1942	2001	60	56.08

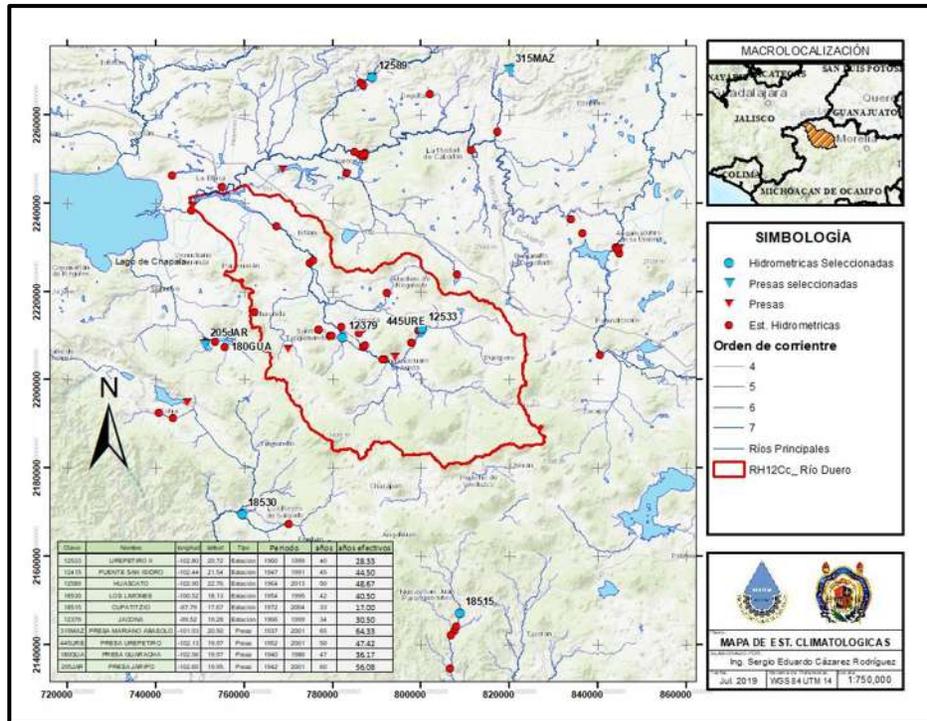


Ilustración 20.- Estaciones Hidrométricas y presas en la zona de estudio.

Adicionalmente a los elementos mencionados se debe considerar la estación hidrométrica de Yurécuaro, ya que esta estación de aforo nos proporcionará la aportación de las cuencas aguas arriba de la cuenca del río Duero, en la Ilustración 21 se muestran los registros históricos de dicha aportación obtenida de BANDAS.

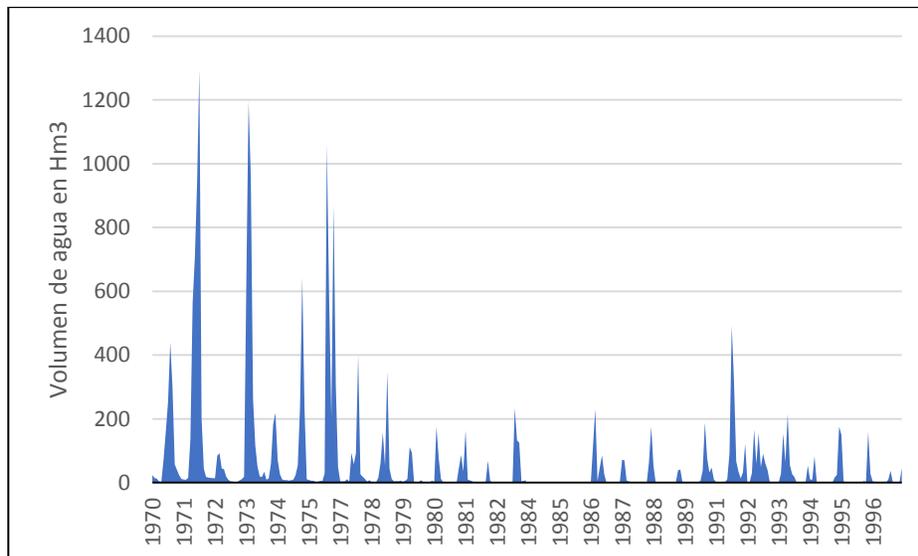


Ilustración 21.- Registro histórico de la estación hidrométrica Yurécuaro.

Infraestructura hidráulica

De entre las 4 presas antes mencionadas es importante considerar más a detalle la presa Urepetiro ya que como se mencionó anteriormente es la de mayor importancia dentro de la cuenca y es la principal infraestructura hidráulica que se utiliza para gestión del recurso. Por lo que es importante contar con las curvas características (Ilustración 22 e Ilustración 23), así como los volúmenes históricos mostrados en la Ilustración 24. Estos datos son proporcionados por CONAGUA en las oficinas correspondientes al DR064 y la base de datos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS).

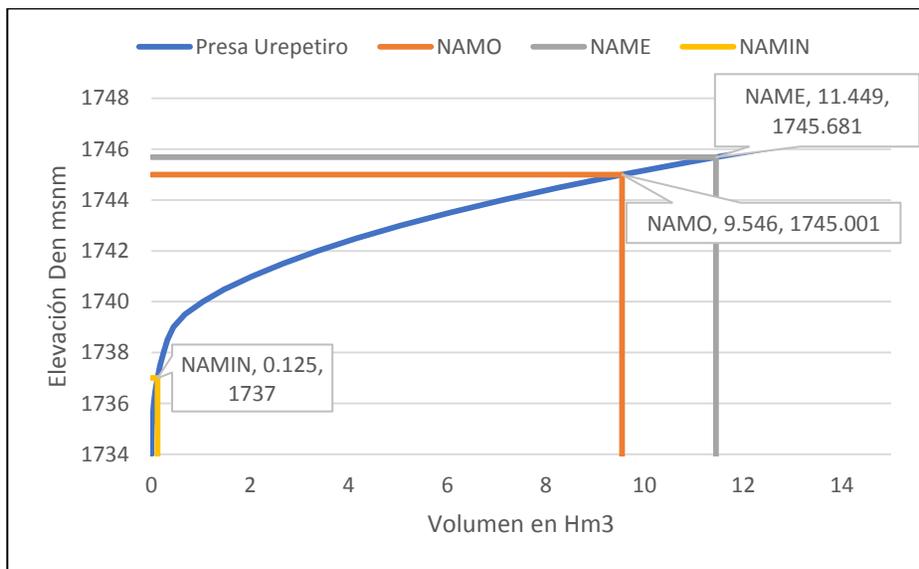


Ilustración 22.- Curva volumen-elevación de la presa Urepetiro.

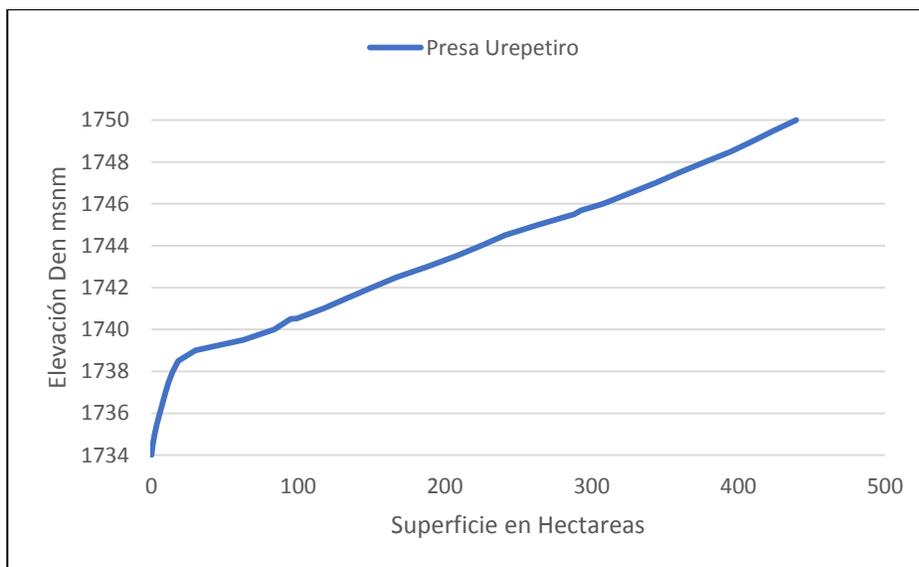


Ilustración 23.- Curva superficie-elevación de la presa Urepetiro.

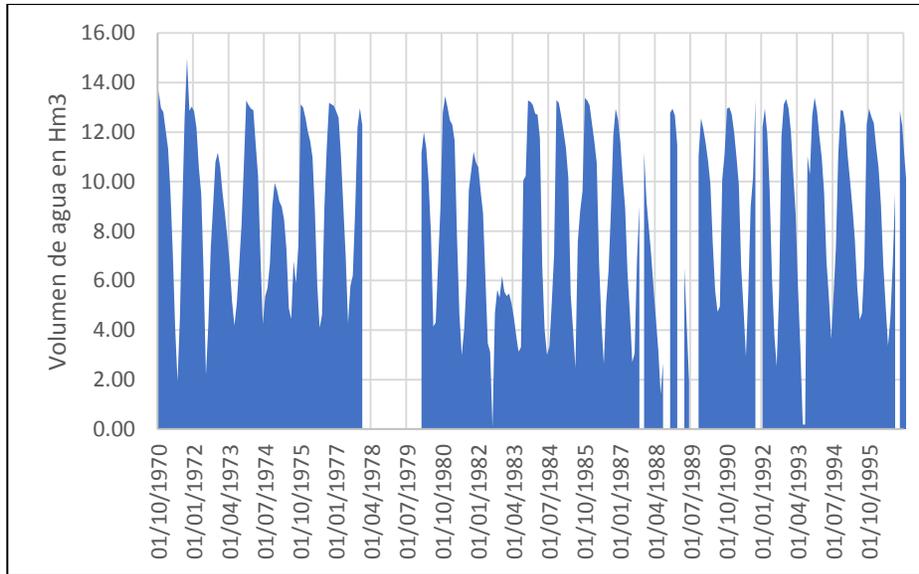


Ilustración 24.- Volúmenes históricos de la presa Urepetiro.

Adicionalmente hay que considerar la presa Barraje de Ibarra la cual se encuentra en el punto de descarga del río Duero al río Lerma, esta presa no se considera como apta para la modelación superficial ya que en este punto del sistema el grado de alteración al flujo natural es muy alto; por otro lado es un elemento esencial del modelo de gestión ya que dota de agua a uno de los sectores del distrito de riego 024 Ciénegas de Chapala, en las Ilustraciones 25, 26 y 27 se muestran sus curvas características y volúmenes históricos.

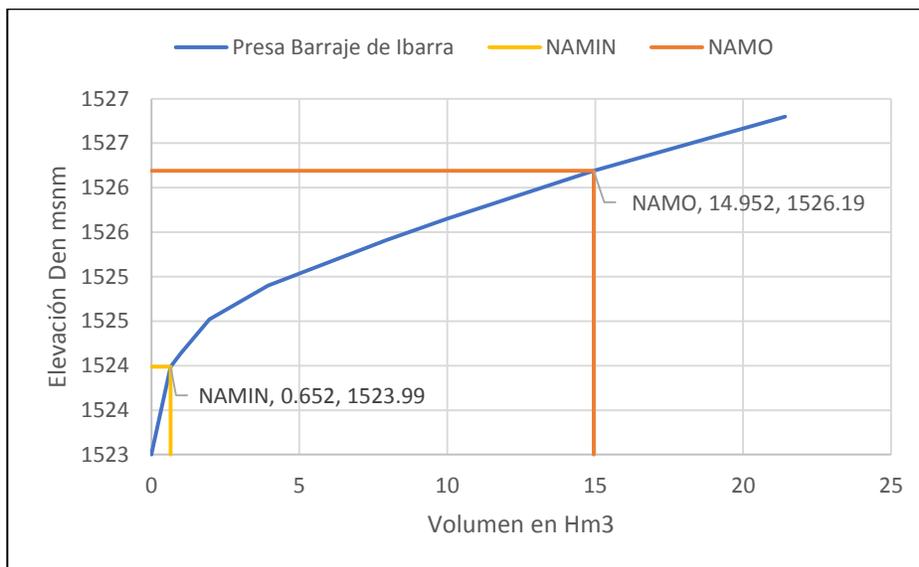


Ilustración 25.- Curva volumen-elevación de la presa Barraje de Ibarra.

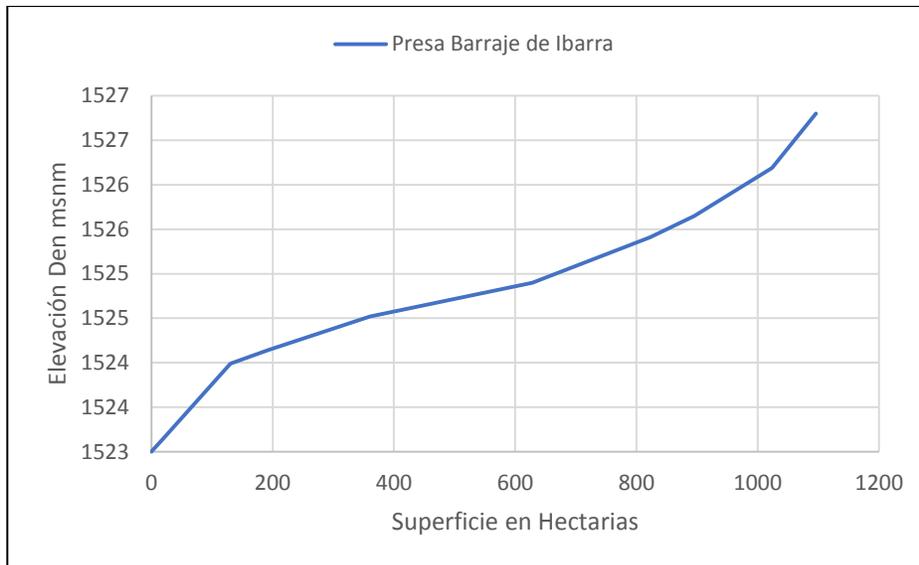


Ilustración 26.- Curva superficie-elevación de la presa Barraje de Ibarra.

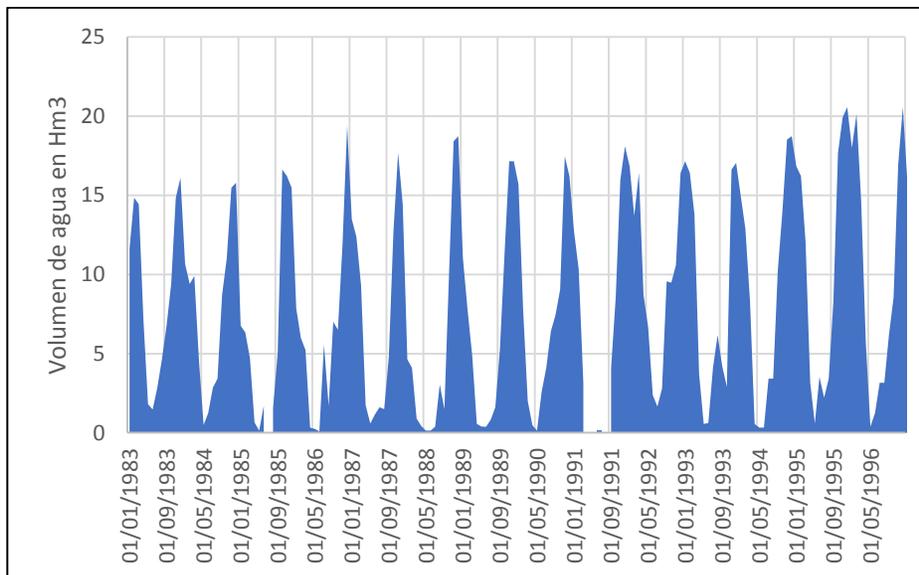


Ilustración 27.-Volúmenes históricos de la presa Barraje De Ibarra.

Otro elemento a considerarse a pesar de ser de origen natural es el lago de Chapala. A pesar de que este es denominado como lago la realidad es que puede considerarse como un embalse ya que cuenta con salidas aguas abajo, por esta razón es necesario considerar la batimetría como curvas características de la topografía realizada en 1981 (Ilustración 28) (información proporcionada por la Comisión Estatal del Agua y Gestión de Cuencas, CEAC), sus niveles históricos (Ilustración 29), y adicionalmente las salidas aguas debajo, ya que será la salida del modelo de gestión (Ilustración 30).

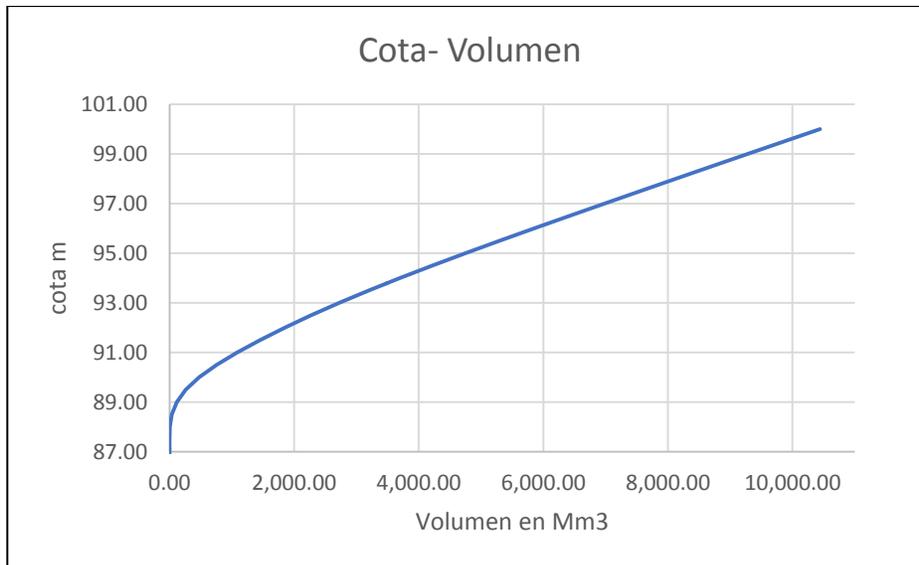


Ilustración 28.- Curva característica del lago de Chapala.

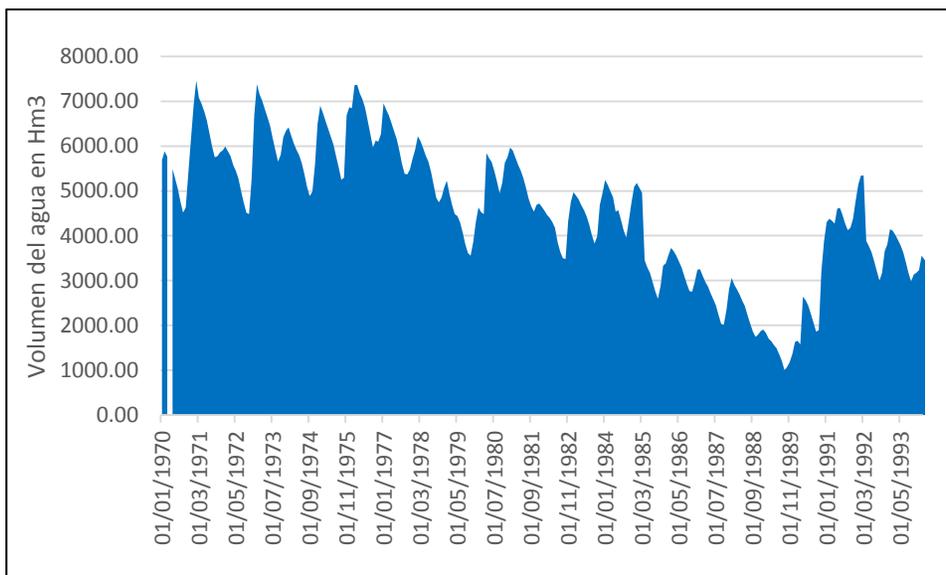


Ilustración 29.- Volumen histórico del lago de Chapala.

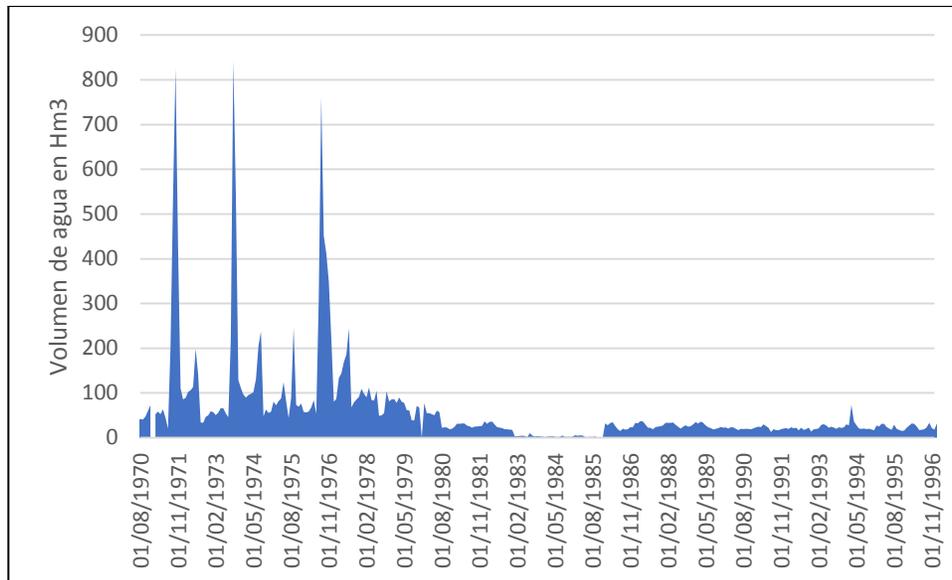


Ilustración 30.- Volumen de salidas aguas abajo del lago de Chapala.

Validación, selección y Análisis Estadístico de los Datos Climatológicos e Hidrométricos.

De la recopilación de datos se obtiene gran cantidad de información, pero aún es necesario purgar dicha información especialmente de las estaciones climatológicas y estaciones hidrométricas, ya que no todas son de utilidad o contienen datos inconsistentes, por lo que primero es necesario una selección de las estaciones en función de ciertos criterios.

Para este procedimiento se desarrolló un software con base en el lenguaje de Matlab al que se llamó GESTAD (GESTion de STADística de datos Climatológicos), este programa permite analizar, validar, seleccionar y llenar datos mensuales de precipitación, a continuación se explica su funcionamiento.

GESTAD (GESTion de STADística de datos Climatológicos).



Ilustración 31. Logo para el software GESTAD.

GESTAD es un software desarrollado para facilitar el análisis, validación y llenado de datos climatológicos el cual tiene como base el programa Matlab, pero es ejecutable en cualquier computadora que cuente con sistema operativo Windows sin necesidad de tener instalado el Matlab.

El software se divide en varios módulos los cuales son:

- Cargado de datos.
- Criterios de discriminación de datos.
- Análisis y validación de datos.
- Selección de estaciones principales.
- Llenado de datos faltantes.
- Validación de datos post-llenado.

Cargado de datos

Para la utilización del programa se requieren dos tipos de archivos previamente preparados:

un directorio el cual debe contar con la clave de las estaciones climatológicas a analizar, así como su coordenada "x", coordenada "y", y elevación en msnm, en este orden y con su encabezado correspondiente, dicho directorio debe guardarse en formato csv (archivo de valores delimitados por comas).

Los archivos de datos de las estaciones climatológicas descargadas de la base de datos de CLICOM en formato .mat; estos datos deben llevar como nombre la clave de la estación climatológica correspondiente.

Ambos formatos de archivo deben guardarse en la misma carpeta.

Esta primera sección tiene por objetivo seleccionar la carpeta de trabajo en la cual se encuentran los archivos a cargar, así como visualizar en tablas y/o gráficas los datos cargados como se muestra en la Ilustración 32.

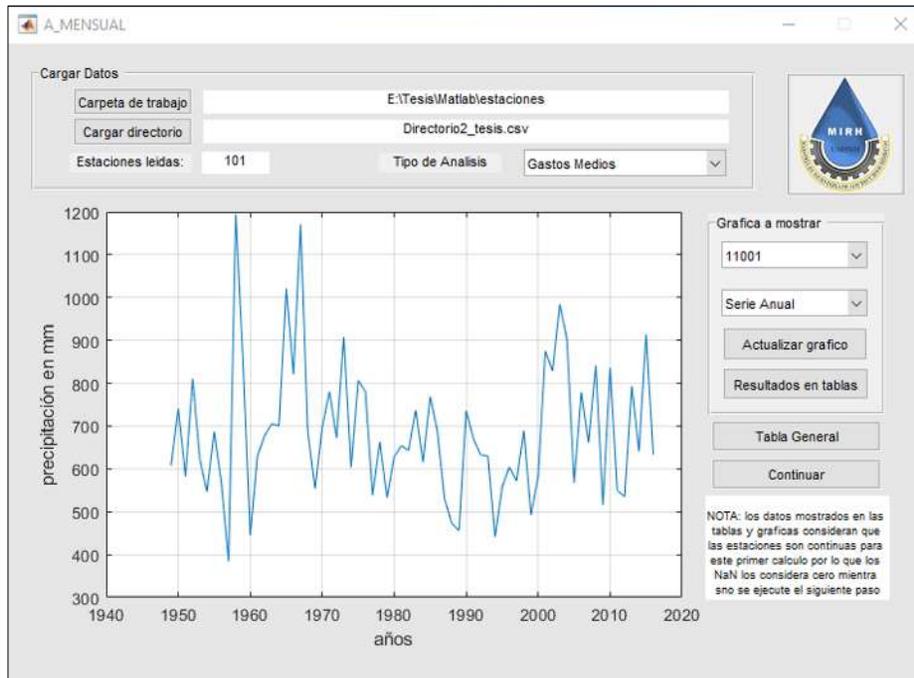


Ilustración 32.- Ventana de cargado de datos en GESTAD.

Criterios de discriminación de datos.

Esta segunda sección tiene por objetivo que el usuario seleccione su criterio para establecer cuantos datos pueden faltar antes de descartar un mes o un año, para ayudar a tomar la mejor decisión el software hace una separación entre datos de meses húmedos y meses secos, con la intención de permitir ser más estrictos en meses húmedos y menos estricto en meses secos.

Una vez tomada la decisión el programa muestra las tablas de datos y gráficas resultados de estas decisiones (Ilustración 33).

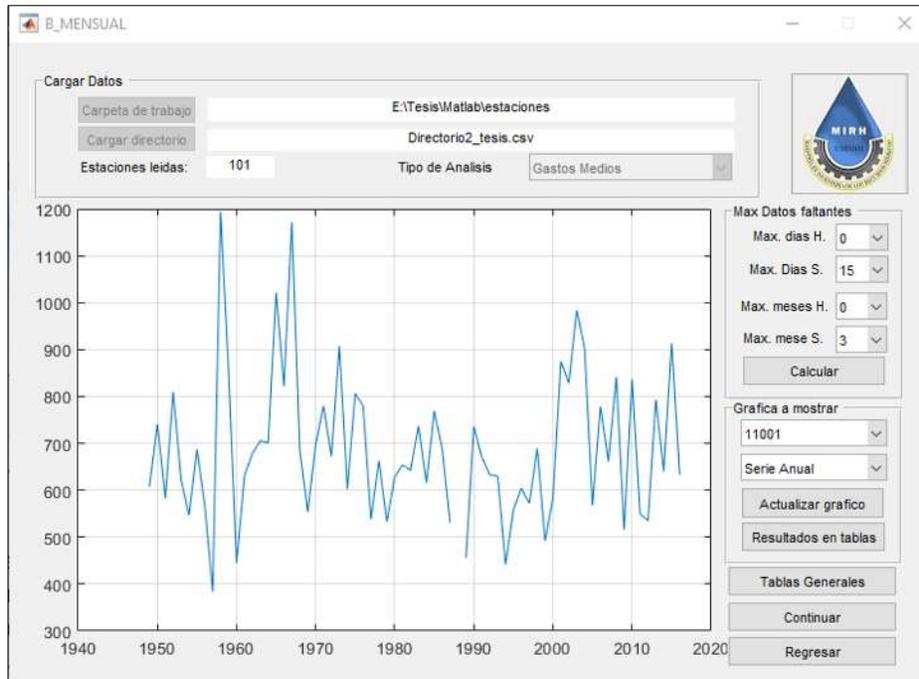


Ilustración 33.- Ventana de criterio de discriminación de datos en GESTAD.

Análisis y validación de datos.

Este módulo es el más denso ya que realiza las pruebas para validación de los datos de cada una de las estaciones y permite eliminarlas de la lista si el usuario así lo desea. Dicha validación de datos se realiza en cuatro niveles (inspección gráfica, homogeneidad, tendencia e independencia) al registro histórico anual. Las pruebas empleadas se desglosan a continuación:

- Pruebas gráficas
 - Media móvil.
- Homogeneidad
 - Test de Secuencias.
 - Test de Helmer.
 - Test T-Student.
 - Test de Cramer.
 - Test de Bartlett.
- Tendencia
 - Test de la Pendiente de la recta de regresión.
 - Test de Spearman.
 - Test de Mann Kendall
- Dependencia o persistencia.
 - Límites de Anderson.
 - Wald-wolfowitz

La presentación de los resultados de las pruebas es en forma matricial y si se desea se pueden ver los resultados gráficos de las pruebas que lo permitan como se puede ver en la Ilustración 34 e Ilustración 35.

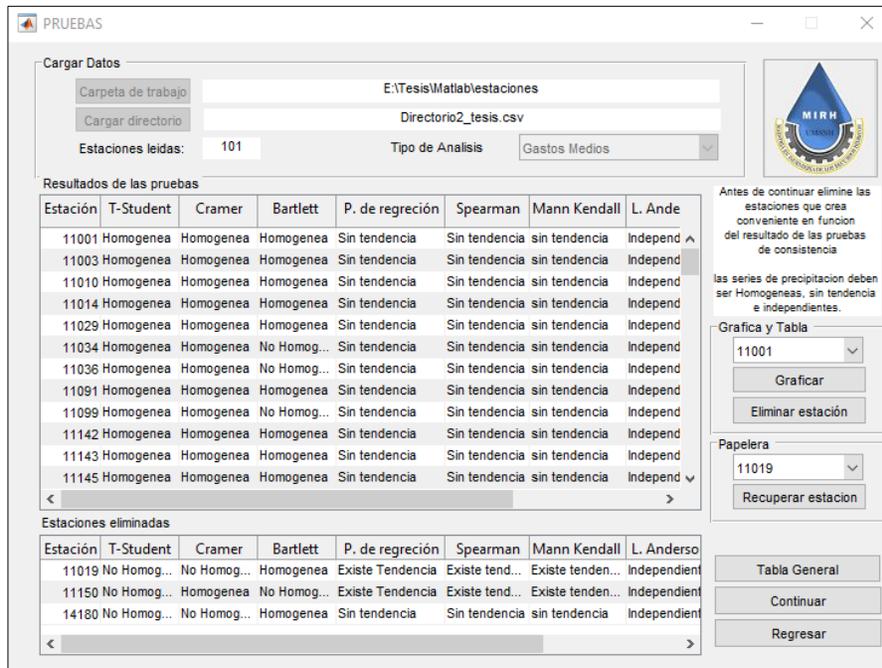


Ilustración 34.- Ventana de análisis y validación de datos en GESTAD.

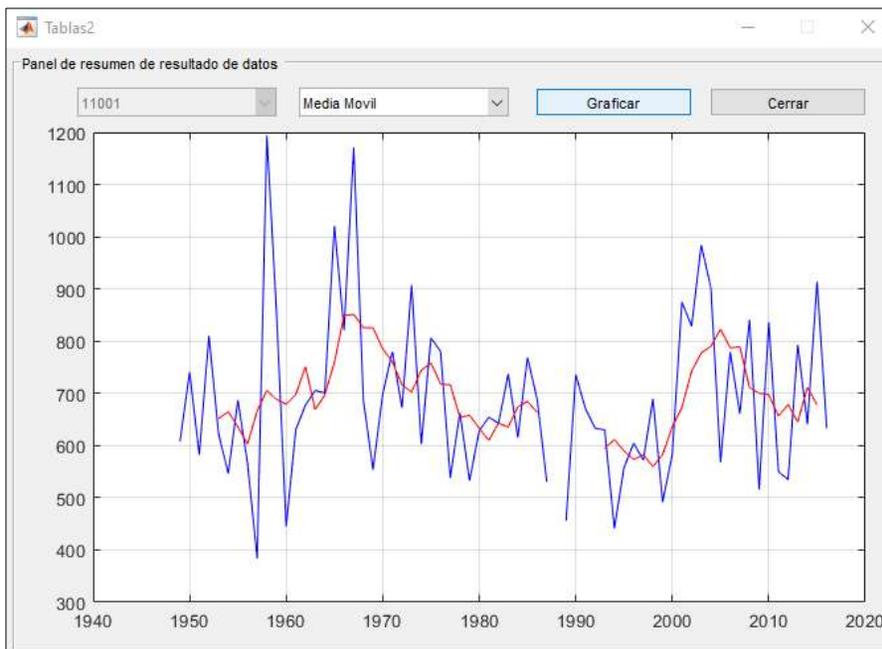


Ilustración 35.- Ventana de resultados gráficos de análisis y validación de datos en GESTAD.

Selección de estaciones principales.

Una vez descartadas las estaciones que no cumplen con los estándares establecidos por el usuario se procede a seleccionar entre las estaciones restantes las que fungirán como estaciones principales. Para realizar este proceso el usuario debe introducir las coordenadas del centroide de la cuenca o punto de interés en coordenadas UTM, así como asignar el peso o importancia que desea dar a los parámetros que analiza el programa. Estos parámetros son:

- Distancia al centroide
- Años de registro
- Años efectivos de registro
- Año último de registro

Una vez establecidos los pesos el programa determinará cuáles son las mejores estaciones y el usuario podrá elegir, adicional al peso el programa indicará el cuadrante con respecto al centroide de cada estación. También el programa mostrará de manera gráfica la ubicación de las estaciones como se muestra en la Ilustración 36.

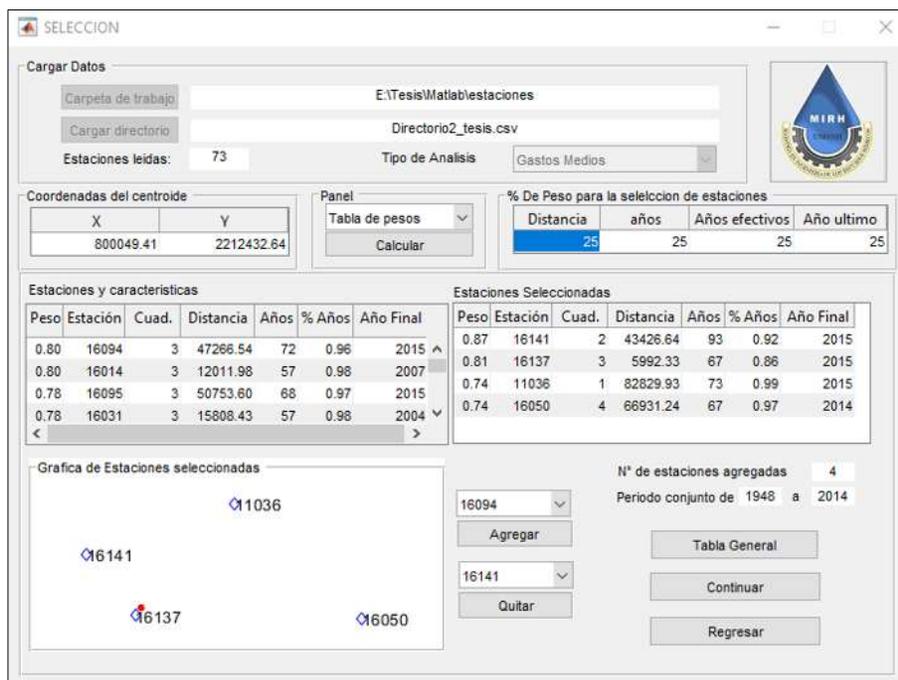


Ilustración 36.-Ventana de selección de estaciones principales en GESTAD.

Llenado de datos faltantes.

Esta sección permite llenar las estaciones principales para el mismo periodo histórico, ya que esto es esencial cuando se desea realizar modelaciones de gestión.

Para realizar el llenado el software cuenta con 3 métodos, regresión lineal simple, regresión lineal múltiple e IDW.

El software permite el llenado de una estación con múltiples métodos por lo que se puede intentar llenar datos con los métodos más completos y los que no se puedan con estos métodos llenarlos con los más sencillos, esto con un apoyo gráfico como se muestra en la Ilustración 37.

Ilustración 37.- Ventana de llenado de datos faltantes en GESTAD.

Validación de datos post-llenado.

Esta última etapa tiene el mismo funcionamiento que la etapa de análisis y validación, con la variación de que la prueba se aplica a las estaciones llenadas con el objetivo de verificar si el llenado de los datos faltantes no alteró el comportamiento de la serie histórica.

Selección y análisis de datos en la zona de estudio

Para el caso particular de la zona de estudio pensando en la modelación subterránea fue necesario ampliar la zona superficial anexando de manera parcial y total las cuencas adyacentes a la cuenca del río Duero. Con estas modificaciones se tiene un área total de estudio de 13,220.71 Km² y está compuesta por 11 subcuenca, las cuales se muestran en la Ilustración 38.

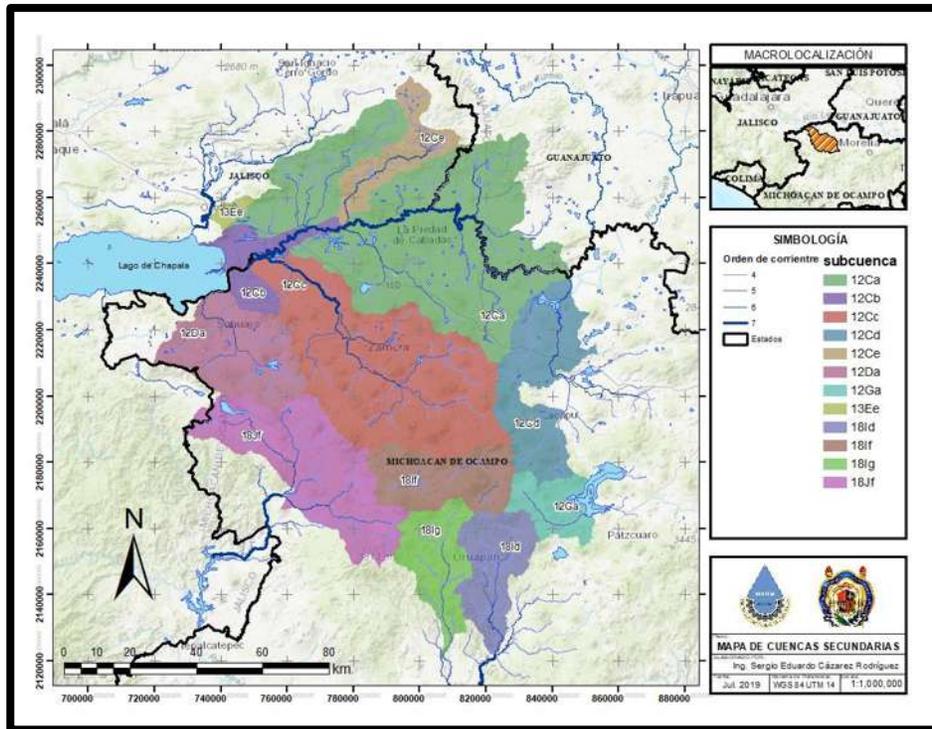


Ilustración 38.- Mapa de Cuencas secundarias.

Selección de estaciones climatológicas

Para la identificación de la cantidad de estaciones requerida para la zona de estudio se utilizó la Ilustración 39. En este caso se optó por realizar la selección de estaciones por subcuenca, esto con el objetivo de reducir el número de estaciones totales al utilizar la misma estación para múltiples cuencas.

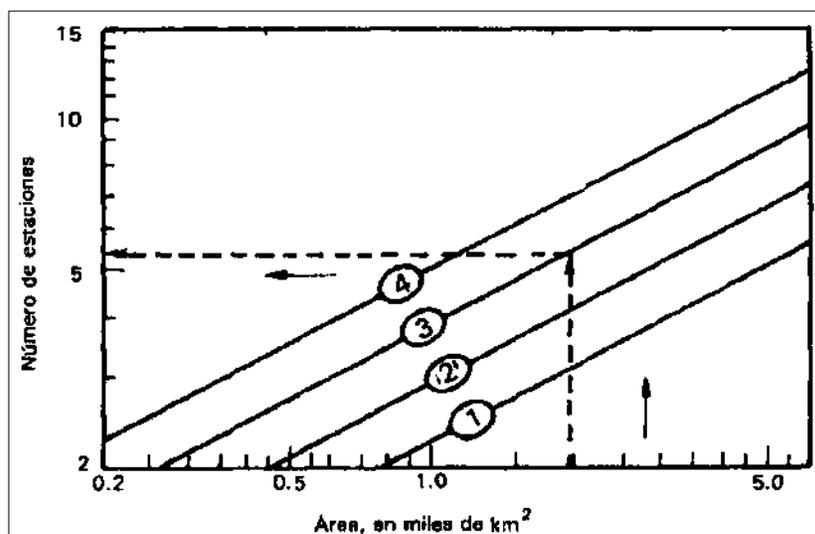


Ilustración 39.- Cantidad mínima de estaciones recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (Aparicio, 1992).

Bajo este criterio las estaciones necesarias por cuenca son las mostradas en la Tabla 10, de la cual se puede observar que se requieren 35 estaciones climatológicas.

Tabla 10.- Centroide, área y número de estaciones por cuenca.

Cuenca	centroide		Área	Nº Est.
	X	Y	Km	
12ca	797979.29	2251067.64	3606.07	5
12cb y13ee	744393.66	2247531.84	374.52	3
12cd	834999.10	2204595.81	1020.53	4
12ce	787700.31	2267039.53	282.49	3
12da	744827.94	2213532.12	971.00	4
12ga	840101.75	2166780.93	394.43	3
18id	821041.45	2146147.08	651.68	3
18if	811188.07	2174504.59	734.27	3
18ig	805716.22	2148208.52	600.02	3
18jf	762756.03	2179019.05	1575.48	4

Como se puede observar si se considerara toda el área se requerirían 35 estaciones principales.

Para este estudio se utilizó para la selección de estaciones principales los criterios mostrados en la Tabla 11 dando menor peso a la cantidad de años ya que en un primer filtro se eliminaron las estaciones con menos de 25 años de registro, y mayor peso a los años efectivos ya que esto da mayor confianza a los datos analizados.

Tabla 11.- Tabla de pesos asignados para la selección de estaciones principales.

	Año ultimo	años	% de vacíos	Distancia
Peso del parámetro	25%	20%	30%	25%

Se realizó la selección de estaciones principales con GESTAD con los pesos anteriormente mencionados para cada cuenca; las estaciones principales para cada una de las cuencas son las mostradas en la Tabla 12; se puede observar que se obtuvieron 19 estaciones en total quitando las estaciones que se repiten en 2 o más subcuencas. Las características de cada una de las estaciones principales determinadas por el software se muestran en la tabla 13.

De manera complementaria en la Ilustración 40 se puede observar la distribución espacial de estas 19 estaciones climatológicas principales.

Tabla 12.- Estaciones seleccionadas para cada microcuenca.

Cuenca	Área Km	N° Est.	Estaciones seleccionadas
12ca	3606.07	5	16141,16024,11036,14076,16094,16031
12cb y13ee	374.52	3	16141,16094,14099,14090
12cd	1020.53	4	16141,16024,11001,16007,16050
12ce	282.49	3	16141,16024,14076,14070,14017
12da	971.00	4	16141,14099,16095,16068,14111
12ga	394.43	3	16024,16007,16050,16087
18id	651.68	3	16141,16007,16050,16127
18if	734.27	3	16024,16007,16127,16014
18ig	600.02	3	16094,16007,16050,16127
18jf	1575.48	4	16141,16094,16007,16162,16073

Tabla 13.- Características de las estaciones principales determinadas con GESTAD.

Clave	Año inicial	Año final	Años	Meses	Años efectivos	% de efectivos
11001	1949	2016	68	813	67.33	99.0%
11036	1943	2015	73	870	71.92	98.5%
14017	1942	2014	73	868	65.08	89.2%
14070	1964	2014	51	612	50	98.0%
14076	1944	2014	71	851	66.92	94.3%
14090	1969	2014	46	542	44.92	97.7%
14099	1947	2014	68	807	64.58	95.0%
14111	1940	2014	75	898	62.75	83.7%
16007	1922	2015	94	1120	90.25	96.0%
16014	1951	2007	57	675	55.58	97.5%
16024	1934	2011	78	917	73.67	94.5%
16050	1948	2014	67	795	64.83	96.8%
16073	1954	1998	45	520	42.17	93.7%
16087	1969	2015	47	562	40.5	86.2%
16094	1944	2015	72	862	69.25	96.2%
16108	1969	2015	47	562	40.67	86.5%
16127	1961	1998	38	450	37.33	98.2%
16141	1923	2015	93	1114	85.5	91.9%
16162	1961	2015	55	658	52.5	95.5%

Con las estaciones mostradas anteriormente fue posible llenar un periodo de datos histórico entre el primero de enero de 1970 y el 31 de diciembre de 1997 ya que es el periodo histórico que comparten todas las estaciones, lo que representa un periodo de 28 años o 336 meses de datos consecutivos, lo que es mayor al intervalo recomendado de 25 años para que se consideren adecuados..

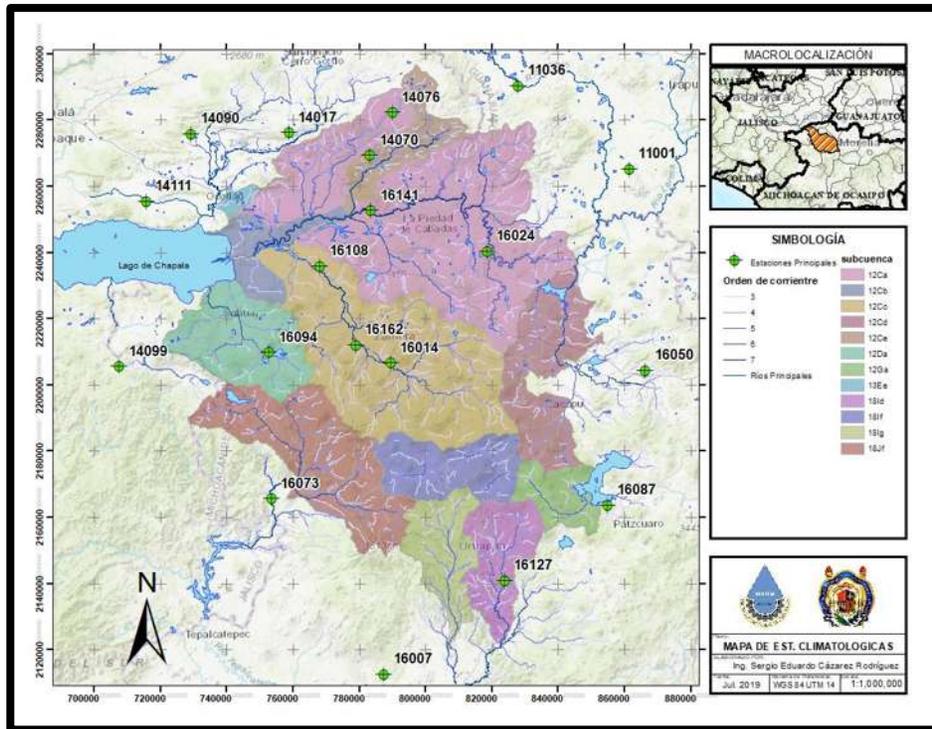


Ilustración 40.- Mapa de estaciones climatológicas principales.

Validación estadística de las estaciones climatológicas e hidrométricas

Como resultado de las pruebas de validación de datos llevadas a cabo en GESTAD a las estaciones antes y después del llenado de datos, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 14. Como se puede observar antes del llenado las estaciones cuentan con las características necesarias para considerarse consistentes, es decir cuentan con calidad en sus datos, y una vez realizado el llenado de datos, las características no se ven afectadas significativamente, debido a esto es que podemos confiar en el llenado realizado a las estaciones.

Tabla 14.- Resultados de las pruebas de consistencia de las estaciones climatológicas antes y después del llenado.

Estación	T-Student	Cramer	Bartlett	P. de regresión	Spearman	Mann Kendall	L. Anderson	Wald-wolfowitz	
11001	Antes	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
	Después	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
11036	Antes	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
	Después	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14017	Antes	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
	Después	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Con tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14070	Antes	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
	Después	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14076	Antes	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
	Después	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14090	Antes	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
	Después	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Con tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14099	Antes	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Dep. a 1 años	Independiente
	Después	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Dep. a 1 años	Independiente
14111	Antes	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
	Después	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16007	Antes	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
	Después	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16014	Antes	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
	Después	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16024	Antes	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	Con tendencia	Independiente	Independiente
	Después	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16050	Antes	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
	Después	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16073	Antes	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
	Después	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16087	Antes	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
	Después	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16094	Antes	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
	Después	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16108	Antes	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
	Después	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16127	Antes	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
	Después	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16141	Antes	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
	Después	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16162	Antes	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Dep. a 1 años	Independiente
	Después	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente

Validación de estaciones Hidrométricas.

Para la selección de las estaciones hidrométricas estas deben someterse a las mismas pruebas de validación que las estaciones climatológicas, especialmente las pruebas de independencia que en este caso el enfoque es contrario a las estaciones climatológicas, ya que los registros históricos de escurrimientos tienden a ser persistentes si se encuentran en régimen natural (Alvarez y Salas, 1989).

En este caso adicionalmente a las pruebas antes mencionadas se utilizó la relación con capacidad de embalse, Hurst, y faller. Alvarez y Salas (1989) observaron que el parámetro de Hurst (h) de la Ecuación (Ec. 57) es una medida de la persistencia, adoptando coeficientes superiores a 0.5 como indicadores de series persistentes.

$$Rn = \delta \left(\frac{\pi}{2} * N \right)^h \tag{Ec. 57}$$

$$Rn = Smax - Smin \tag{Ec. 58}$$

$$S_1 = x_1 - \bar{x} ; S_2 = x_1 - \bar{x} + x_2 - \bar{x} ; \dots ; S_N = x_1 - \bar{x} + x_2 - \bar{x} + \dots + x_N - \bar{x} \tag{Ec. 59}$$

Como resultado de las pruebas a las estaciones hidrométricas y entrada de flujo a las presas se tienen la Tabla 15.

Tabla 15.- Resultados de validación de estaciones hidrométricas y entradas a presas.

Clave	Nombre	T-student	Cramer	Bartlett	Regresión	Speaman	Mann Kendal	Anderson	Horst y Faller
12533	UREPETIRO II	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Existe Tendencia	Existe tendencia	Existe tendencia	Independiente	CUMPLE
12589	HUASCATO	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Existe Tendencia	Existe tendencia	Existe tendencia	Independiente	CUMPLE
18530	LOS LIMONES	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Existe Tendencia	Existe tendencia	Existe tendencia	Dep. a 2 años	CUMPLE
18515	CUPATITZIO	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	CUMPLE
12379	JACONA	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	CUMPLE
315MAZ	PRESA MARIANO A.	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Dep. a 4 años	CUMPLE
445URE	PRESA UREPETIRO	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Dep. a 2 años	CUMPLE
180GUA	PRESA GUARACHA	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Dep. a 1 años	CUMPLE
205JAR	PRESA JARIPO	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Dep. a 4 años	CUMPLE

En base a los resultados mostrados anteriormente se optó por descartar la estación 12533 Urepetiro II ya que después de consultar en el catálogo de BANDAS se descubrió que esta estación mide el gasto que la presa del mismo nombre no retiene, es decir se encuentra claramente en régimen alterado, pero en compensación se toman los registros de ingreso a la presa Urepetiro. Para el caso de la estación 12589 Huascato se pudo llegar a la conclusión, por medio de un análisis gráfico, que existe una alteración en los escurrimientos de 1984 en adelante, esto puede deberse a la construcción de algún tipo de obra como se muestra en la Ilustración 41, por lo que se optó por usarla, pero tomar como valido solo el periodo anterior a 1984.

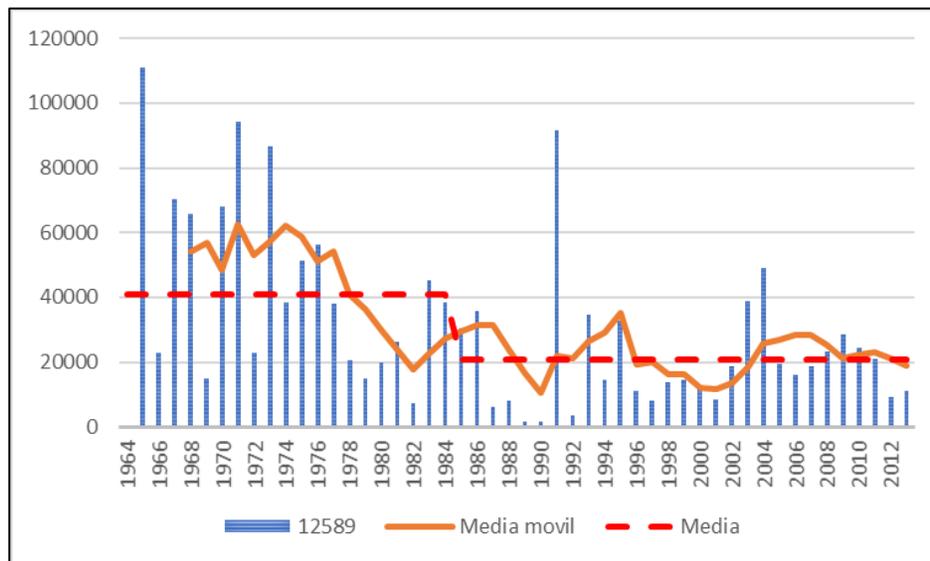


Ilustración 41.- Comportamiento histórico de la estación hidrométrica 12589 Huastaco.

Por último, para el caso de la estación hidrométrica 18530 Los limones se tomó la estación a falta de más estaciones en la zona con la consideración de usar los resultados obtenidos con precaución.

Modelación del sistema superficial.

Lo primero que debe considerarse para poder decir el modelo superficial o modelo lluvia-escorrentamiento es propiamente el modelo a usar, anteriormente en la metodología se definieron 4 posibles modelos a usar, por lo que primero debe definirse cual se usará.

Selección del modelo.

En este caso el modelo a emplear se decidió considerando las limitaciones de los datos existentes, mientras los datos climatológicos tienen un amplio rango de datos, la estación hidrométrica cuenta con solo 15 años de datos que nos servirán para calibrar, debido a esto se usará el principio de parsimonia para definir cuál es la cantidad de variables necesarias para usar cada uno de los modelos.

El principio de parsimonia o también conocido como Navaja de Ockham indica que las soluciones más complejas no siempre son las mejores, por el contrario pueden conllevar a resultados poco confiables si no se cuenta con toda la información necesaria, es por esto que la Ecuación (Ec. 60) establece un índice de parsimonia (δ) en el cual valores bajos (4-6) violentan el principio, en cambio valores grandes (>15) indican una muy buena relación entre variables y parámetros, lo que indica que es un excelente modelo a emplearse (Alvarez y Salas, 1989).

$$\delta = \frac{N}{K} \quad (\text{Ec. 60})$$

Donde:

- N es la cantidad de variables.
- K es el número de parámetros.

En la Tabla 16 podemos ver el índice de parsimonia para cada modelo planteado.

Tabla 16.- Índices de parsimonia para los distintos modelos planteados.

Modelo	Parámetros	Numero de Variables		Índice de Parsimonia	
		Escorrimento	Precipitación	Escorrimento	Precipitación
Témez	4	180	336	45	84
HBV	7	180	336	25	48
Sacramento	17	180	336	10.6	20
GR4J	4	180	336	45	84

De la aplicación de este principio podemos ver que en base a los escurrimientos todos los métodos cumplen con este principio a excepción del modelo Sacramento, el modelo HBV como se comentó con anterioridad es un modelo diseñado para gastos diarios por lo que puede conllevar cierto error al realizar modelaciones mensuales, debido a esto también es descartado.

En comparativa el método de Témez y GR4J cumplen con las características para ser empleados, pero en este caso se optó por usar el modelo de Témez ya que este tiene una aplicación amplia en México y el mundo.

Identificación de microcuencas de modelación y traslado de datos.

El modelo de Témez como ya se mencionó es un modelo agregado por lo que cuando se modelan cuencas grandes deja de ser un método eficaz, es por esto que es recomendable hacer la modelación de la cuenca por partes (subcuencas) que a su vez se van anidando unas con otras generando un modelo agregado, pero de mayor precisión para el cálculo, para esto se tomaron las estaciones hidrométricas seleccionadas.

Resultado de este procedimiento se obtuvieron 96 microcuencas de las cuales es posible la calibración de 8 ya que cuentan con una de las estaciones hidrométricas validadas en su punto de salida, dichas cuencas son las mostradas en la Ilustración 42.

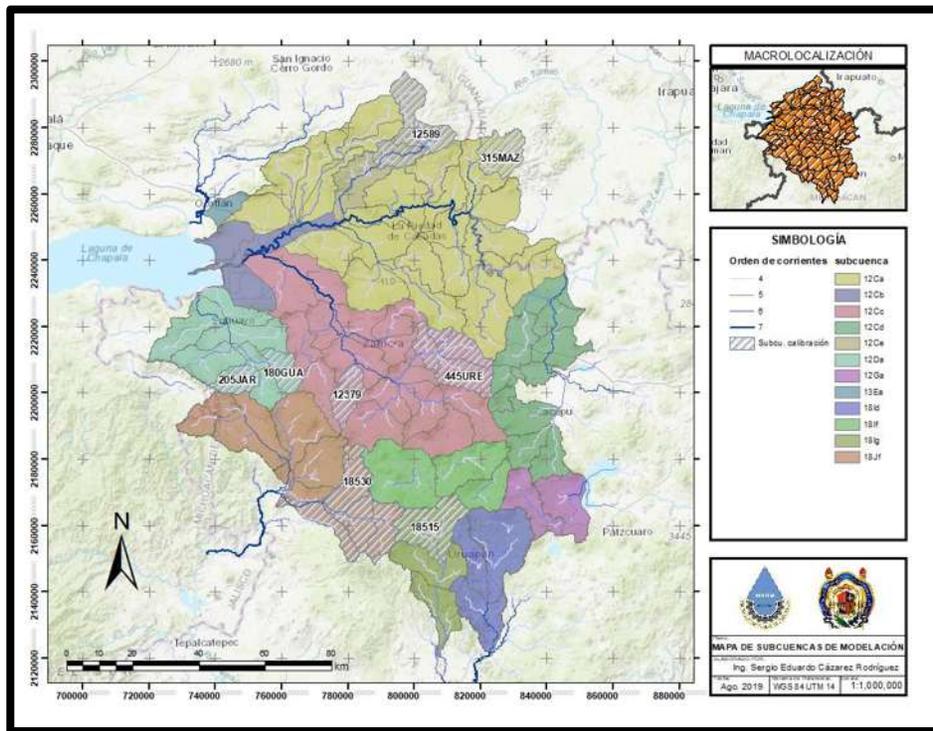


Ilustración 42. Mapa de microcuencas de modelación.

Datos de entrada al modelo.

Una vez que se conocen las microcuencas a modelar es necesario determinar los datos de entrada, los cuales corresponden a la precipitación la cual se obtuvo de la validación y llenado de datos, así como la evapotranspiración potencial, la cual se calcula para cada una de las 19 estaciones seleccionadas por el método de Thornthwaite descrito anteriormente.

Por último, se trasladan los datos previamente llenados y validados a las microcuencas, esto se realizó por el método de IDW anteriormente mencionado, pero solo se usaron en esta ocasión las estaciones principales llenadas y validadas, y como estación objetivo se utilizó una estación ficticia ubicada en el centroide de cada microcuenca.

Para esto se realizó un código derivado de GESTAD para facilitar el traslado a cada microcuenca cuya interfaz se presenta en la Ilustración 43.

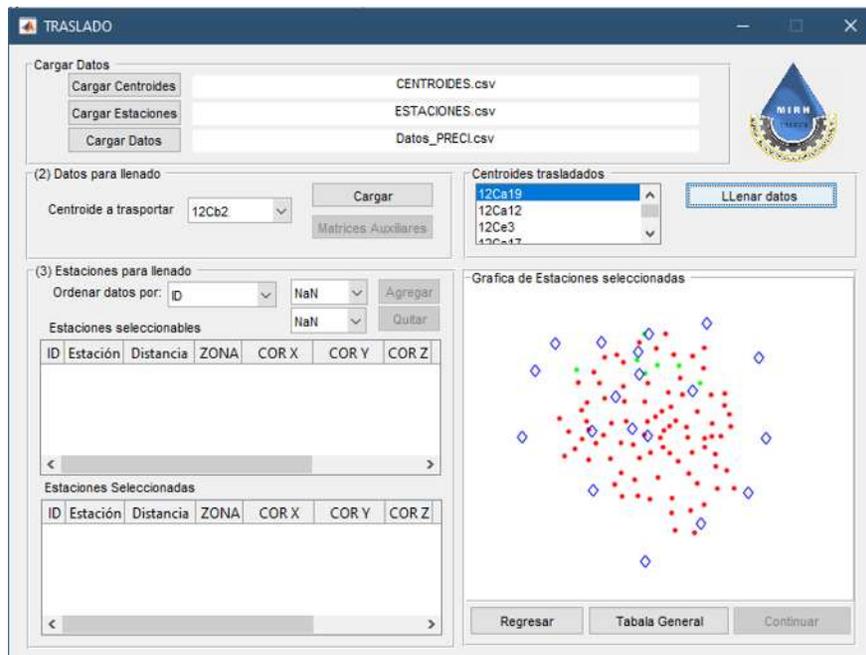


Ilustración 43.- Interfaz de código de traslado de datos derivado de GESTAD.

Resultados de validación y calibración del modelo superficial.

Microcuenca 12589

Para esta microcuenca se consideró solo como efectivo el periodo de 1970 a 1785 por lo que solo se utilizó este periodo para calibrar el modelo y no se realizó validación, los parámetros de calibración resultantes fueron los mostrados en la Tabla 17, Tabla 18 Ilustración 44, Ilustración 45, Ilustración 46.

Tabla 17.- Parámetros de calibración de la microcuenca 12589.

Hmax	C	lmax	Alfa
342.391	0.251	10.000	0.296

Tabla 18.- Ajuste del modelo en la microcuenca 12589.

Criterio	Estadístico	Ajuste
Nash	0.865	Excelente
Logaritmo de Nash	0.887	Excelente
Coficiente de Pearson	0.931	Excelente

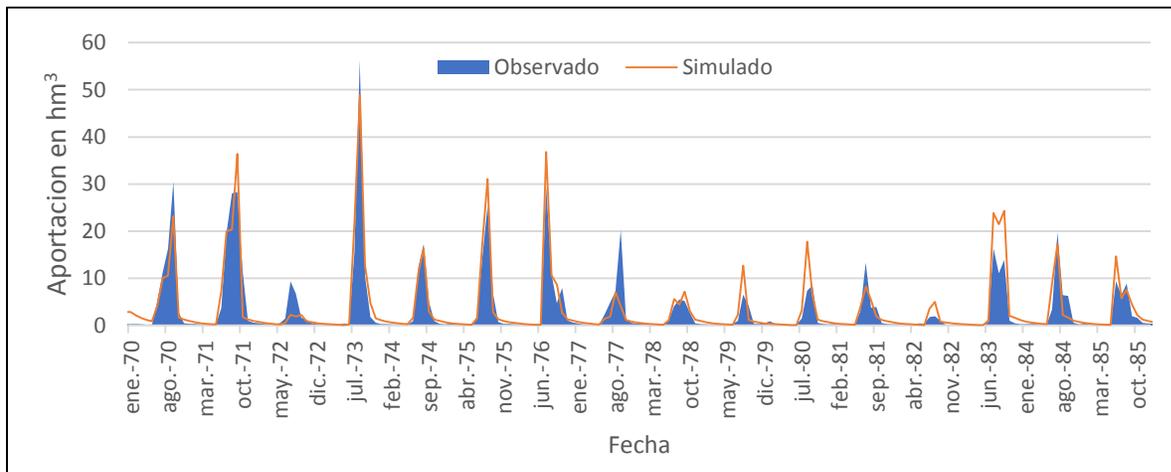


Ilustración 44.- Gráfica de resultados de la calibración mensual de la estación 12589.

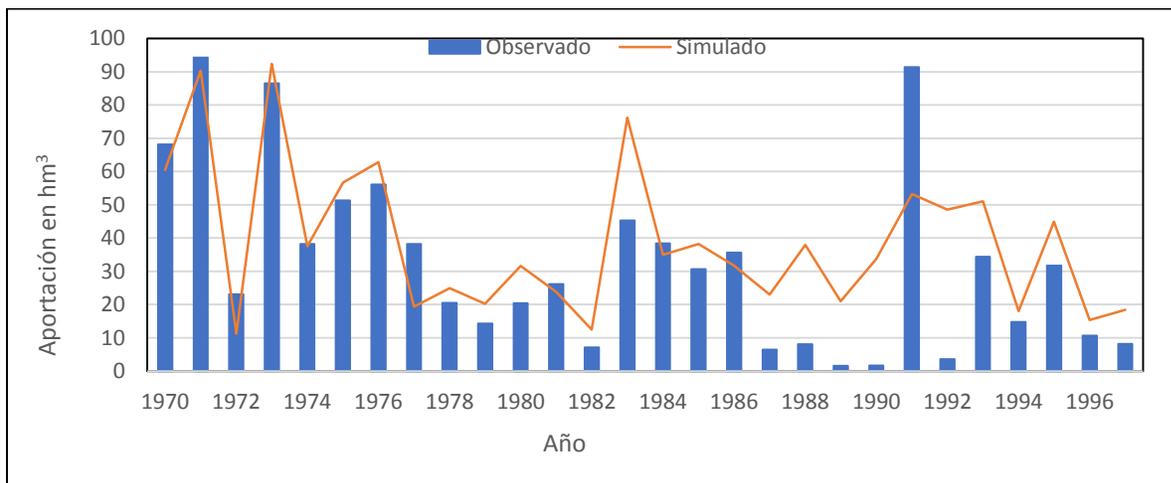


Ilustración 45.- Gráfica de resultados de calibración anual de la estación 12589.

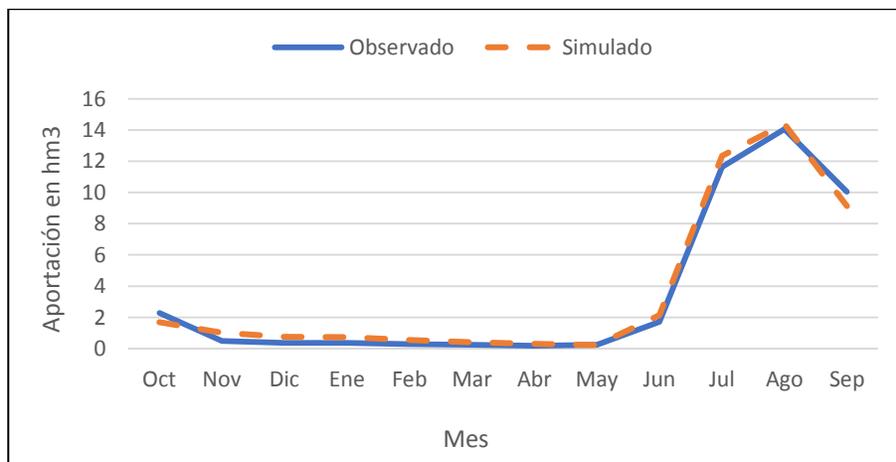


Ilustración 46.- Gráfica de resultados de calibración del año medio de la estación 12589.

Como se puede observar en las gráficas y los indicadores de ajuste, esta calibración tubo resultados excelentes.

Microcuenca 18530

La estación hidrométrica correspondiente a esta microcuenca, como se mencionó anteriormente no cumple con la prueba para considerarla, aún así se consideró el periodo de 01/01/1970 a 01/02/1781 para la validación y de 01/02/1781 a 01/03/1995 de periodo de validación. Los resultados de la calibración se muestran en la Tabla 19, Tabla 20, Ilustración 47, Ilustración 48, Ilustración 49 e Ilustración 50.

Tabla 19.- Parámetros de calibración de la microcuenca 18530.

Hmax	C	Imax	Alfa
10.001	0.01	175.26	0.0523

Tabla 20.- Ajuste del modelo en la microcuenca 18530.

Criterio	calibración	Ajuste	Validación	Ajuste
Nash	0.378	satisfactorio	0.523	bueno
Logaritmo de Nash	0.330	satisfactorio	0.099	insuficiente
Coefficiente de Pearson	0.784	Bueno	0.750	Bueno

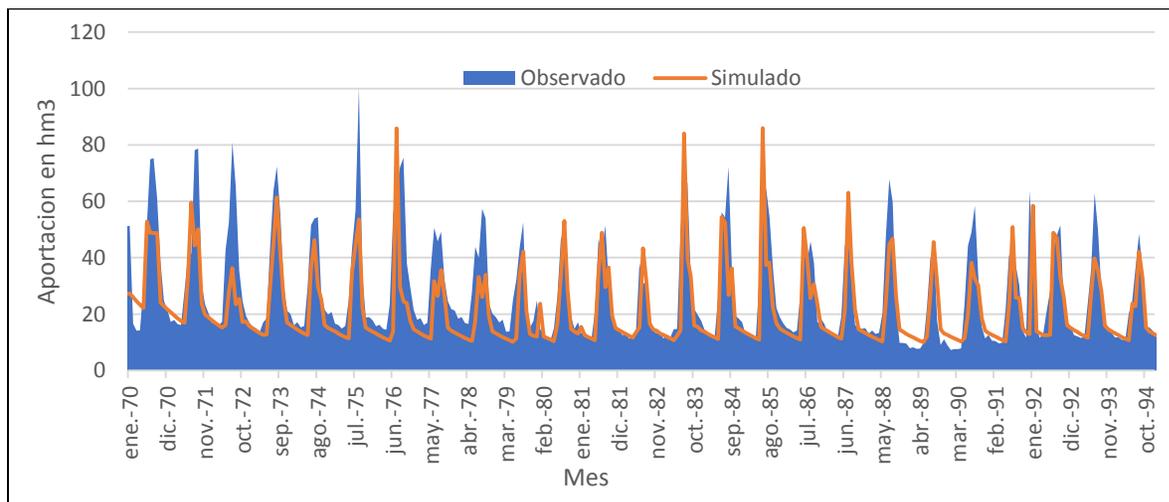


Ilustración 47.- Gráfica de resultados de la calibración mensual de la estación 18530.

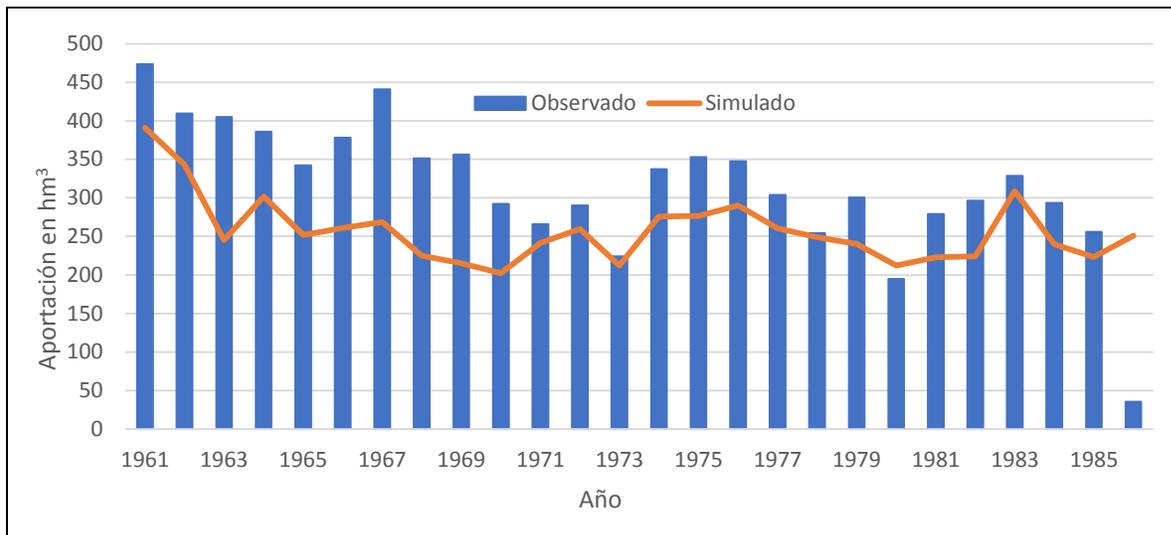


Ilustración 48.- Gráfica de resultados de calibración anual de la estación 18530.

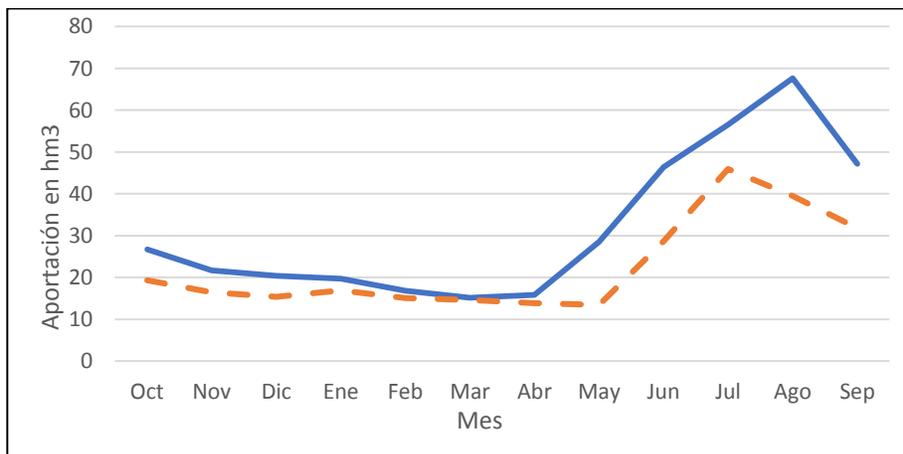


Ilustración 49.- Gráfica de resultados de calibración del año medio de la estación 18530.

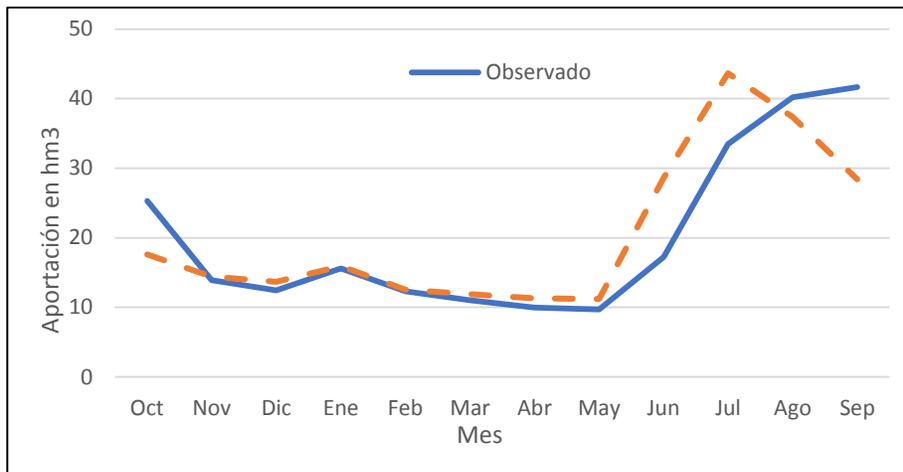


Ilustración 50.- Grafica de resultados de validación del año medio de la estación 18530.

A pesar de que los resultados de esta calibración muestran resultados satisfactorios, los parámetros determinados para la humedad máxima y coeficiente c resultan muy bajos y poco realistas.

Microcuenca 12379

Esta subcuenca cuenta con una aportación importante proveniente de agua subterránea, dicha aportación emana del manantial de Camacaro y representa la mayor parte del escurrimiento, adicionalmente se puede observar un cambio en la media del escurrimiento a partir de 1984, por lo que el periodo de calibración para el modelo se tomó del 01/01/1970 al 01/04/1978 llegando a los resultados mostrados en la Tabla 21, Tabla 22, Ilustración 51, Ilustración 52 e Ilustración 53.

Tabla 21.- Parámetros de calibración de la microcuenca 12379.

Hmax	C	Imax	Alfa
27.882	0.011	2499.554	0.024

Tabla 22.- Ajuste del modelo en la microcuenca 12379.

Criterio	Estadístico	Ajuste
Nash	0.458	Bueno
Logaritmo de Nash	0.548	Bueno
Coficiente de Pearson	0.679	Satisfactorio

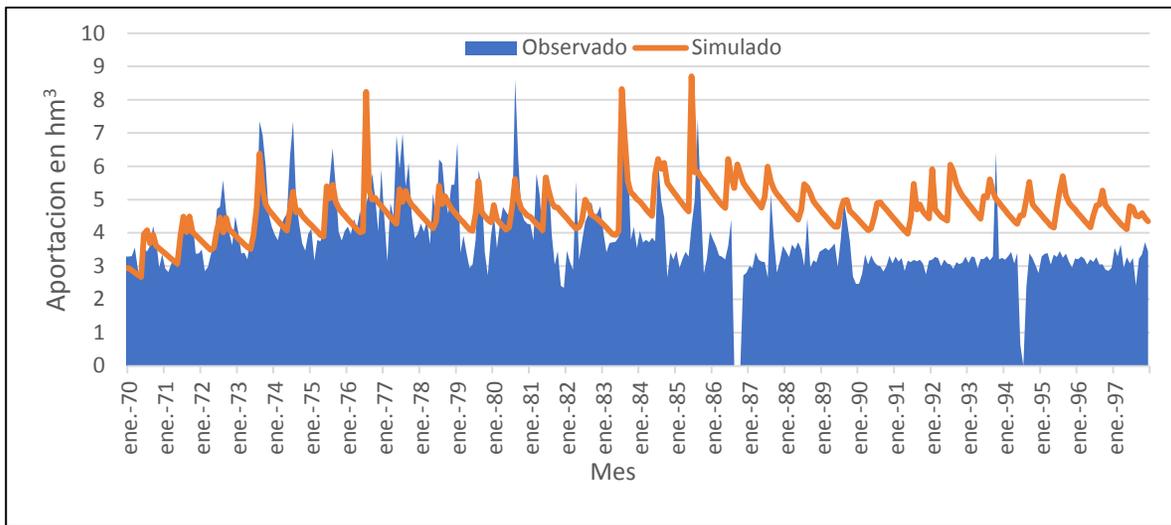


Ilustración 51.- Gráfica de resultados de la calibración mensual de la estación 12379.

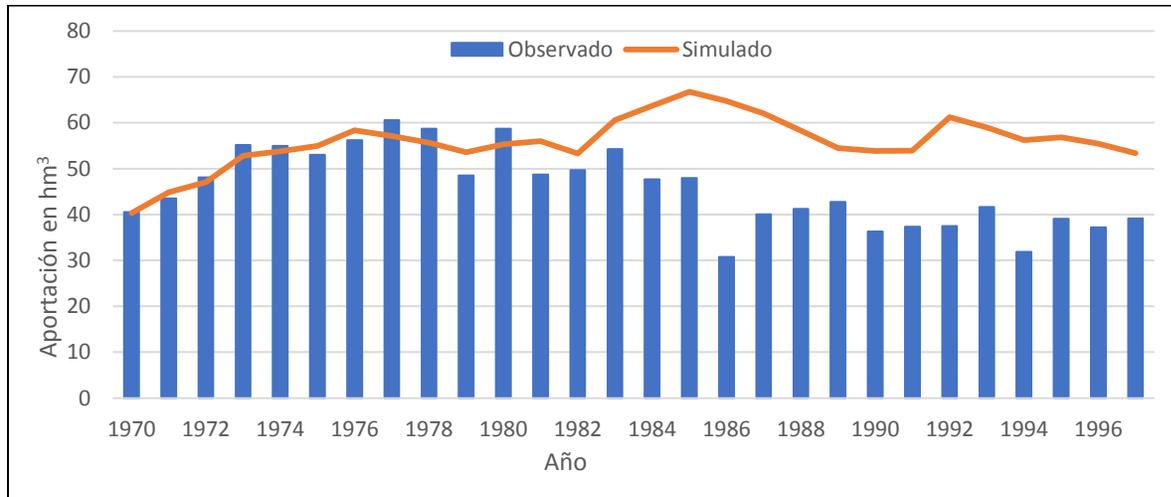


Ilustración 52.- Gráfica de resultados de calibración anual de la estación 12379.

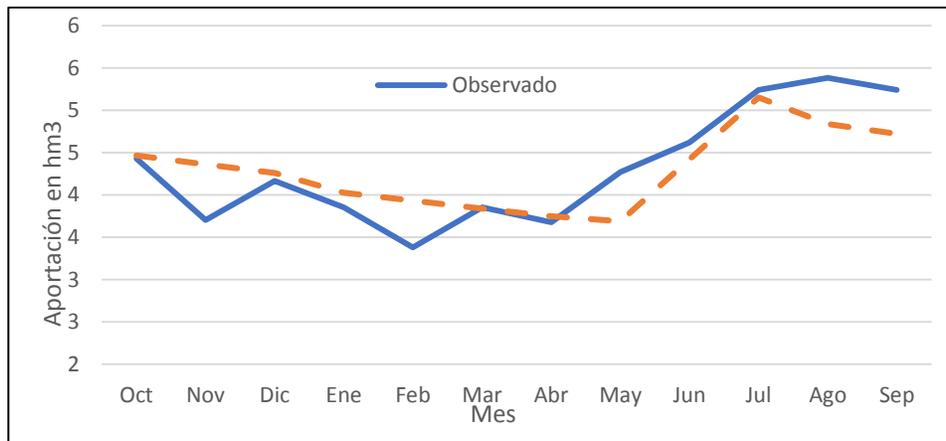


Ilustración 53 .- Gráfica de resultados de calibración del año medio de la estación 12379.

Microcuenca 315MAZ

Esta calibración se realizó con los datos registrados de ingreso a la presa y se tomó el periodo del 01/01/1972 al 01/12/1985 para calibrar y no se contó con periodo para validad. Como resultados se obtuvieron los mostrados en la Tabla 23, Tabla 24, Ilustración 54, Ilustración 55 e Ilustración 56.

Tabla 23.- Parámetros de calibración de la microcuenca 315MAZ.

Hmax	C	lmax	Alfa
331.210	0.227	21.324	0.395

Tabla 24.- Ajuste del modelo en la microcuenca 315MAZ.

Criterio	Estadístico	Ajuste
Nash	0.594	Bueno
Logaritmo de Nash	0.410	Bueno
Coficiente de Pearson	0.774	Bueno

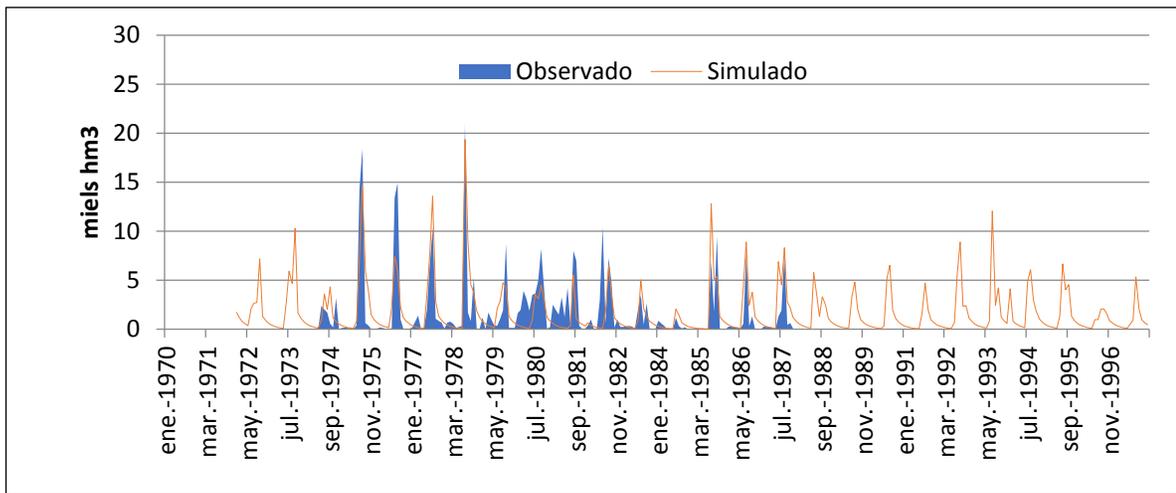


Ilustración 54.- Gráfica de resultados de la calibración mensual de la estación 315MAZ.

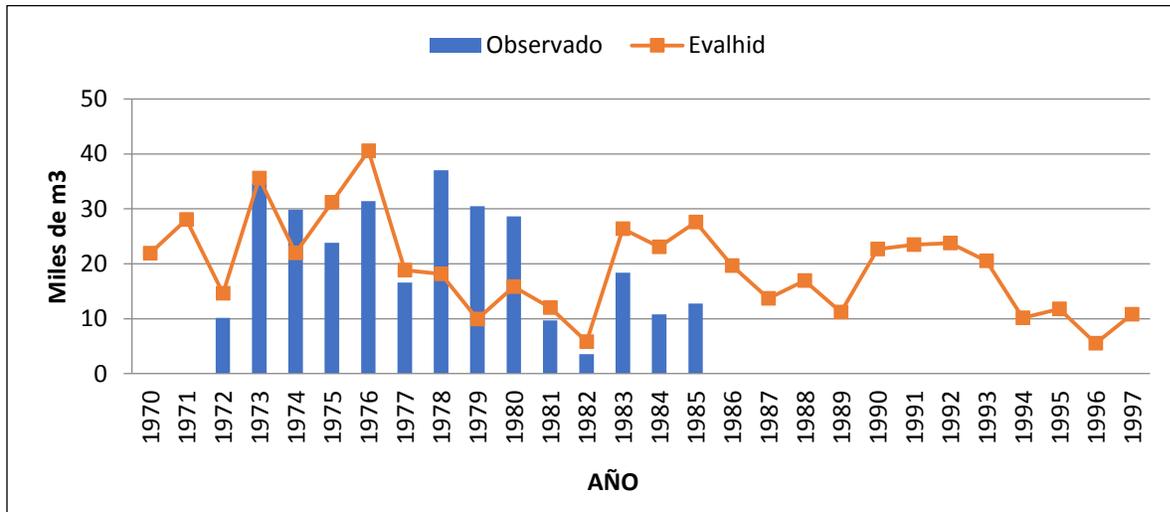


Ilustración 55.- Gráfica de resultados de calibración anual de la estación 315MAZ.

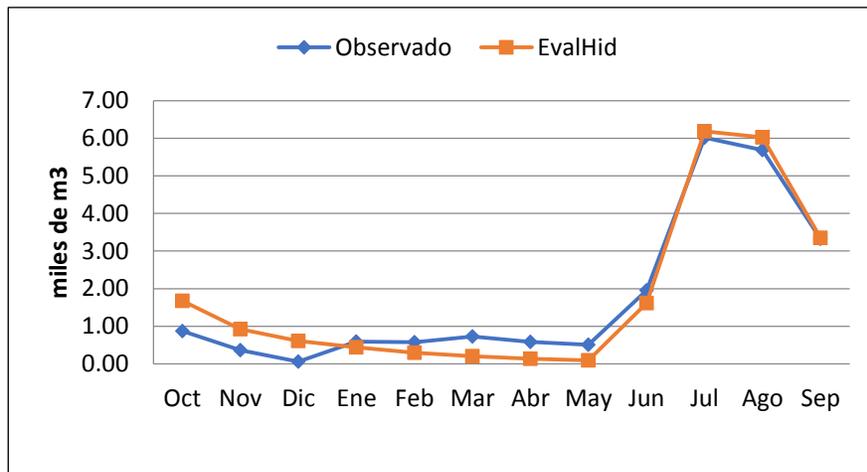


Ilustración 56.- Gráfica de resultados de calibración del año medio de la estación 315MAZ.

La calibración para esta cuenca resulta de manera general buena contando con parámetros coherentes por lo que se puede decir que los resultados son buenos.

Microcuenca 445URE

Esta cuenca de calibraron es de las más importantes ya que la presa 445URE Urepetiro es la principal presa de riego en el río Duero, para el periodo de calibración se usó el periodo de 01/01/19970 al 01/12/1997 lo que representa 7 años de datos y como periodo de calibración se usó el intervalo del 01/01/1980 al 01/09/1987, para estos intervalos se tienen los resultados Tabla 25, Tabla 26, Ilustración 57, Ilustración 58, Ilustración 59 e Ilustración 60.

Tabla 25.- Parámetros de calibración de la microcuenca 445URE.

Hmax	C	lmax	Alfa
393.783	0.218	250.393	0.478

Tabla 26.- Ajuste del modelo en la microcuenca 445URE.

Criterio	Calibración	Ajuste	Validación	Ajuste
Nash	0.722	Muy bueno	0.625	Muy bueno
Logaritmo de Nash	0.690	Muy bueno	0.568	Bueno
Coeficiente de Pearson	0.850	Bueno	0.804	Bueno

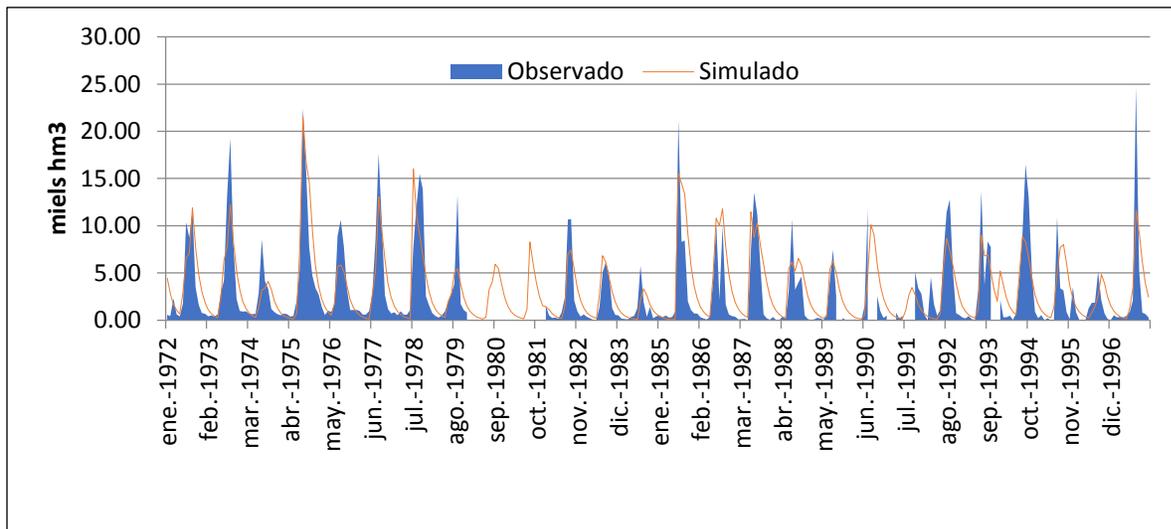


Ilustración 57.- Gráfica de resultados de la calibración mensual de la estación 445URE.

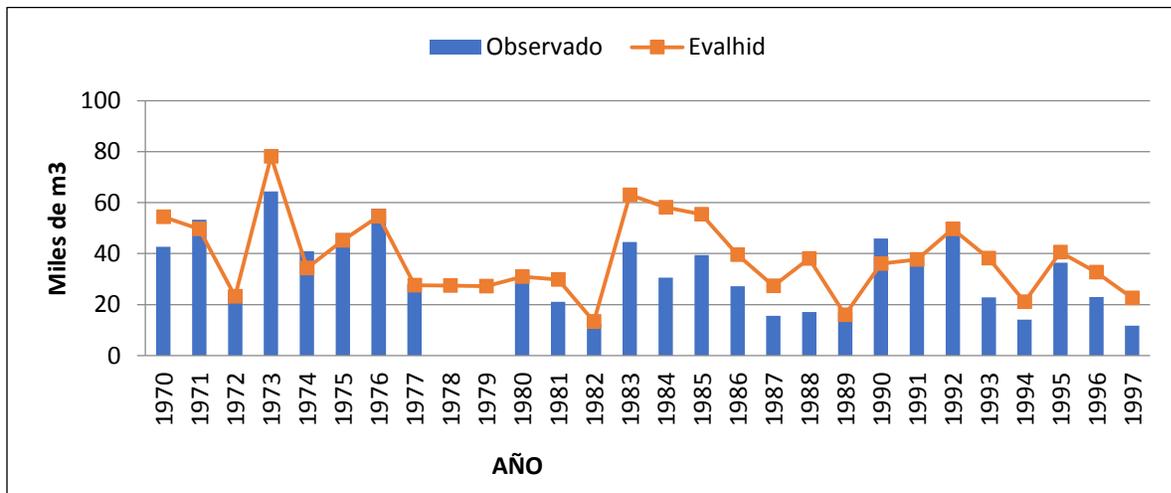


Ilustración 58.- Gráfica de resultados de calibración anual de la estación 445URE.

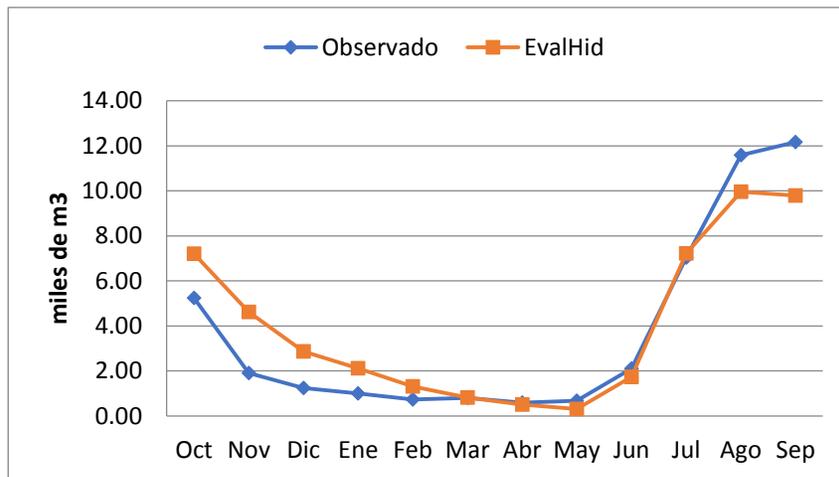


Ilustración 59.- Gráfica de resultados de calibración del año medio de la estación 445URE.

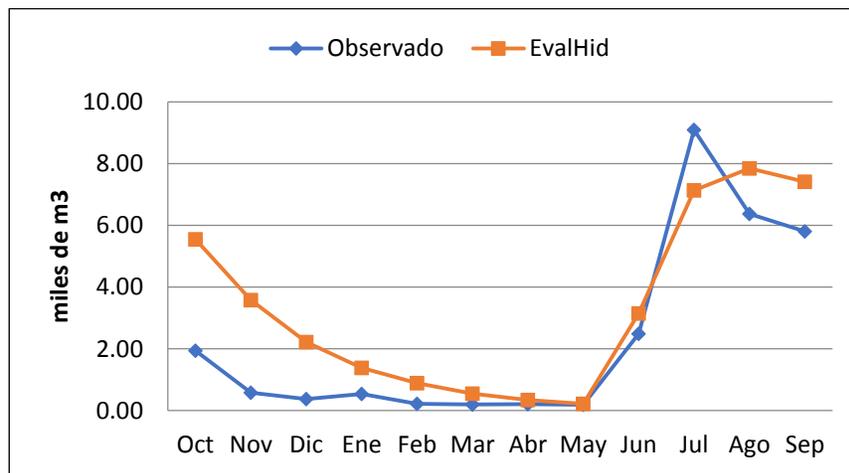


Ilustración 60.- Gráfica de resultados de validación del año medio de la estación 445URE.

Como se puede observar la calibración resultó entre buena y muy buena, en cambio la validación de resultados es menor ajuste, pero aún siguen estando entre los resultados buenos y los parámetros de calibración se encuentra en un nivel aceptable.

Microcuenca 180GUA

Para esta cuenca se utilizó el periodo de calibración del 01/01/1970 al 01/12/1978, se observó que después de este periodo se tiene una disminución en los registros hidrométricos por lo que una validación resulta poco fiable, a continuación se muestran los resultados en la Tabla 27,

Tabla 28, Ilustración 61, Ilustración 62 e Ilustración 63.

Tabla 27.- Parámetros de calibración de la microcuenca 180GUA.

Hmax	C	I _{max}	Alfa
116.028	0.100	547.137	0.215

Tabla 28.- Ajuste del modelo en la microcuenca 180GUA.

Criterio	Estadístico	Ajuste
Nash	0.545	Bueno
Logaritmo de Nash	0.332	Satisfactorio
Coefficiente de Pearson	0.740	Satisfactorio

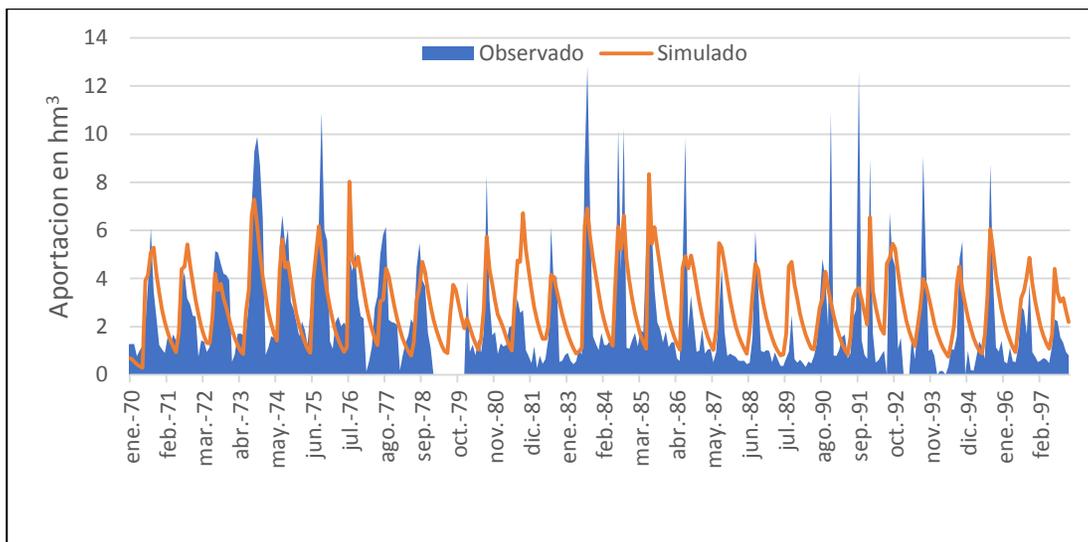


Ilustración 61.- Gráfica de resultados de la calibración mensual de la estación 180GUA.

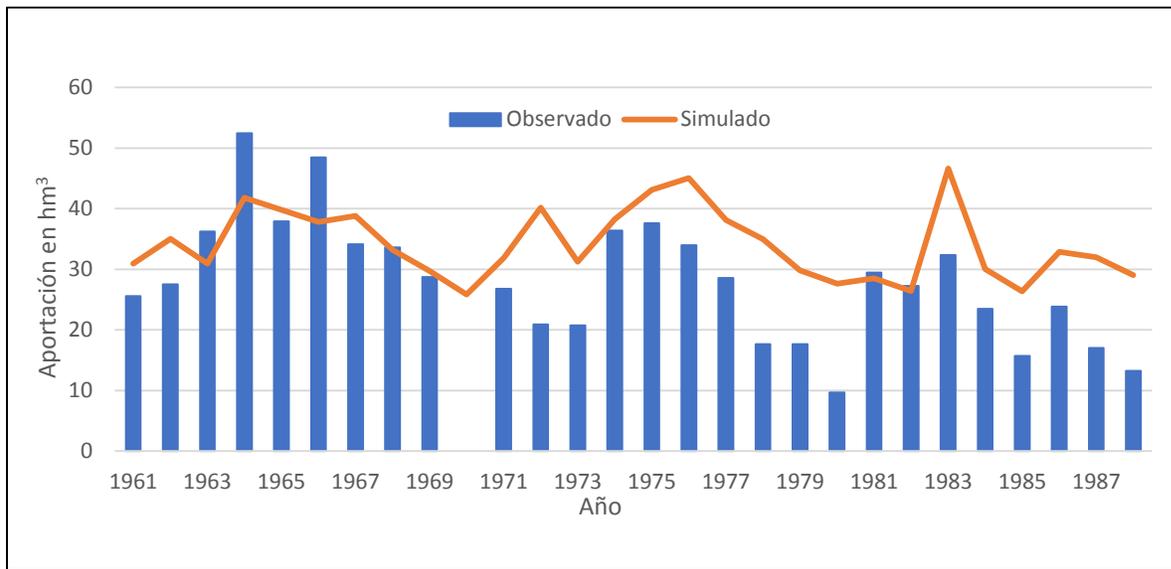


Ilustración 62.- Gráfica de resultados de calibración anual de la estación 180GUA.

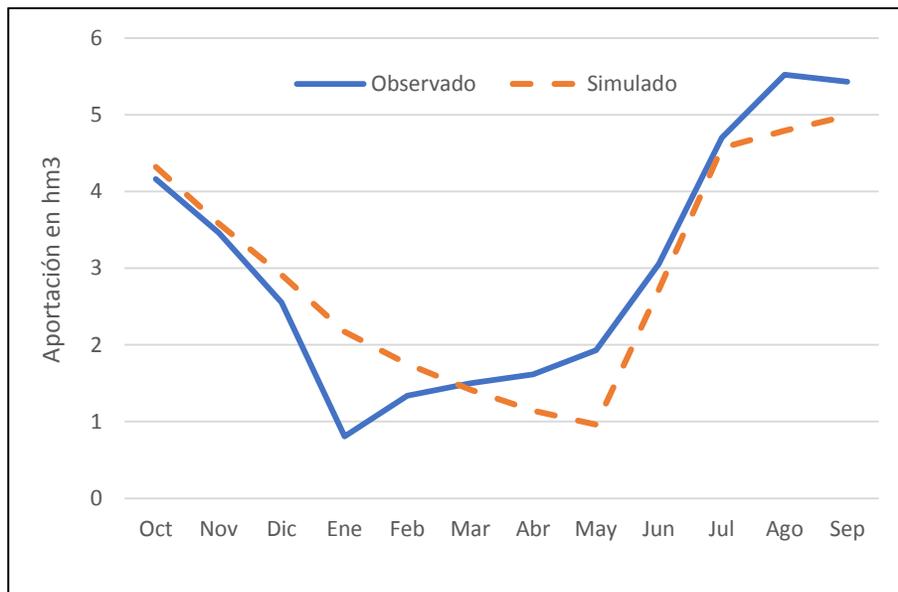


Ilustración 63.- Gráfica de resultados de calibración del año medio de la estación 180GUA.

De esta calibración se puede observar que se tienen valores altos de infiltración máxima, esto se debe a que en la zona se presentan materiales altamente permeables. Los parámetros de calibración son principalmente satisfactorios por lo que se puede considerar como buena la calibración.

Microcuenca 205JAR

Para la calibración de esta cuenca solo se cuenta con registro del 01/01/1980 al 01/06/1992, lo que representa menos de 12 años y consecuentemente no es posible realizar validación de los datos; los resultados obtenidos son los mostrados en la Tabla 29, Tabla 30, Ilustración 64 e Ilustración 65.

Tabla 29.- Parámetros de calibración de la microcuenca 205JAR.

Hmax	C	lmax	Alfa
419.624638	0.2197194	23.4635435	0.24973029

Tabla 30.- Ajuste del modelo en la microcuenca 205JAR.

Criterio	Estadístico	Ajuste
Nash	0.5917	Bueno
Logaritmo de Nash	0.5954	Bueno
Coefficiente de Pearson	0.7766	Bueno

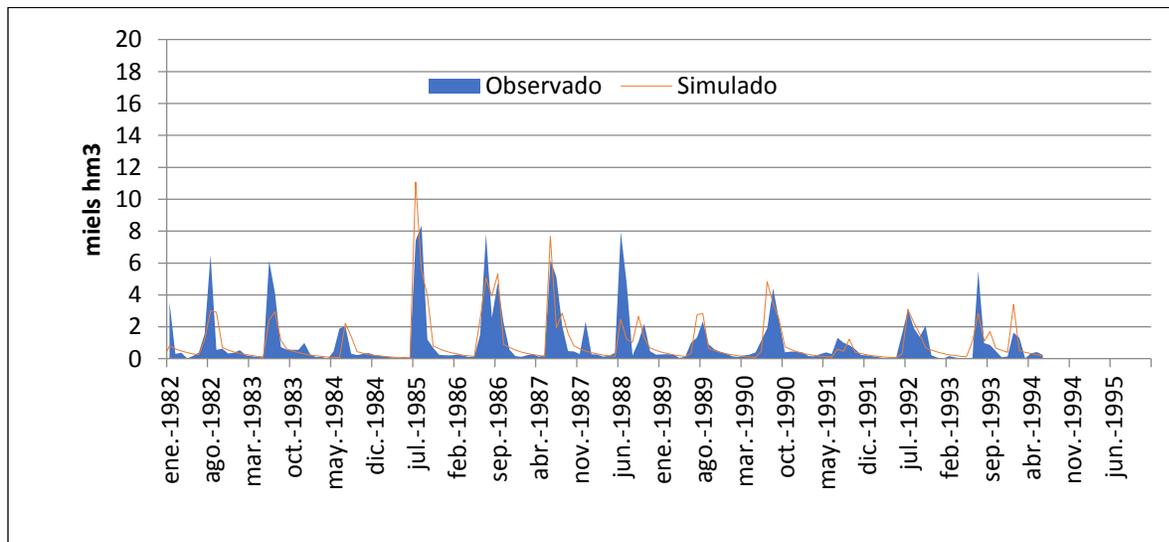


Ilustración 64.- Gráfica de resultados de la calibración mensual de la estación 205JAR.

Para el caso de esta calibración los resultados son buenos y los parámetros obtenidos son consistentes con la geología de la zona por lo que se acepta la calibración como correcta.

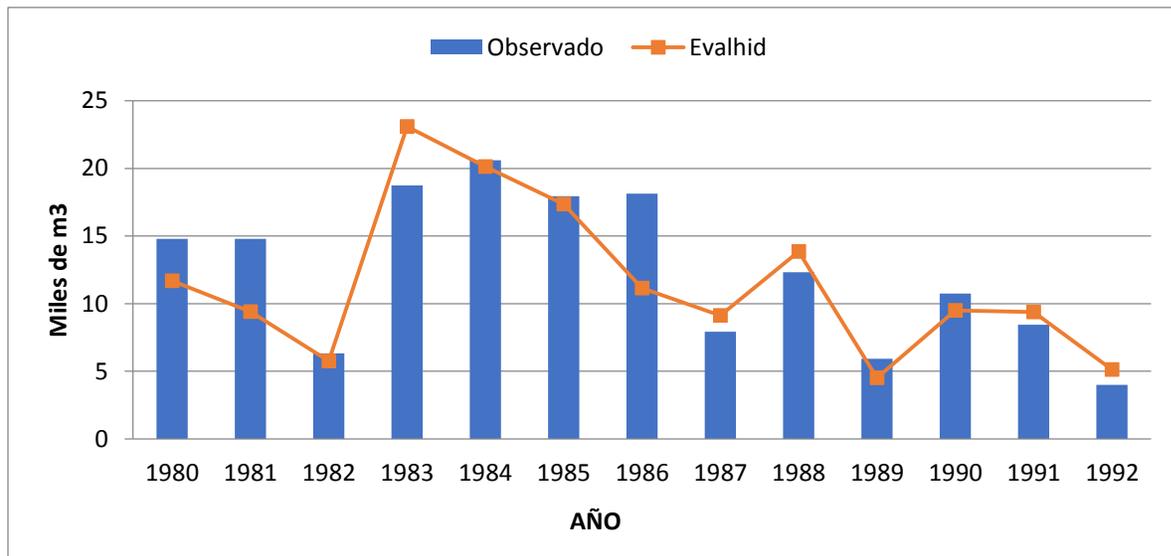


Ilustración 65.- Gráfica de resultados de calibración anual de la estación 205JAR.

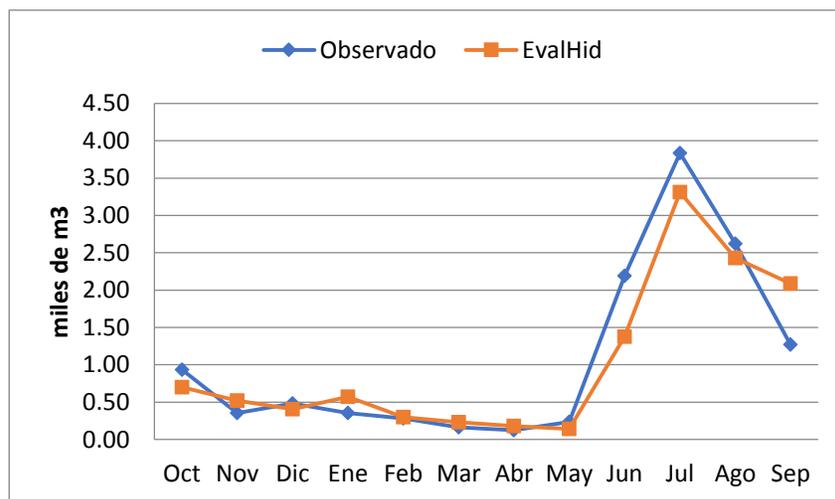


Ilustración 66.- Gráfica de resultados de calibración del año medio de la estación 205JAR.

Resumen de resultados

A manera de resumen de resultados de calibración se presenta la Tabla 31 en la que se puede observar los coeficientes de calibración por medio de los diferentes métodos antes mencionadas para cada una de las cuencas calibradas.

Tabla 31.- Resumen de resultados de calibración para cada microcuenca.

Criterio	12589	18530	12379	315MAZ	445URE	180GUA	205JAR
Nash	0.865	0.378	0.458	0.594	0.722	0.545	0.5917
Logaritmo de Nash	0.887	0.33	0.548	0.41	0.69	0.332	0.5954
Coeficiente de Pearson	0.931	0.784	0.679	0.774	0.85	0.74	0.7766
Promedio	0.894	0.497	0.562	0.593	0.754	0.539	0.655
Condición	Excelente	Bueno	Bueno	Bueno	Muy bueno	Bueno	Muy bueno

Traslado de parámetros

Para el traslado de parámetros a las cuencas a las que no es posible calibrar se empleó el método clúster o de agrupación mencionada anteriormente, para esto es necesario aplicar la metodología de agrupación multivariada con el modelo de Ward antes mencionado.

Primeramente se tienen que decidir las variables a usar, para este caso los parámetros que se trasladaran son la humedad máxima del suelo (Hmax), Coeficiente de escurrimiento (C), infiltración máxima (Imax) y velocidad de infiltración (Alfa), por lo que las variables seleccionadas son el uso de suelo, la textura del suelo y la geología en porcentaje de cobertura de cada microcuenca. Como método de asociación se usa la Distancia Euclídea debido a su sencillez y finalmente como método de agrupación el método de Ward.

Para la aplicación de este método se empleó el software JMP 6.0 Statistical Discovery From SAS, obteniendo el dendograma mostrado en la Ilustración 68, en el cual se identificaron 6 grupos multivariados con las siguientes características:

-Grupo 1:

Litología Andesítica de textura fina y principalmente dedicado a agricultura y campos de matorrales.

-Grupo 2:

Litología Principalmente de Basaltos y toba riolítica de textura fina y media dedicado a la agricultura y campos de matorrales.

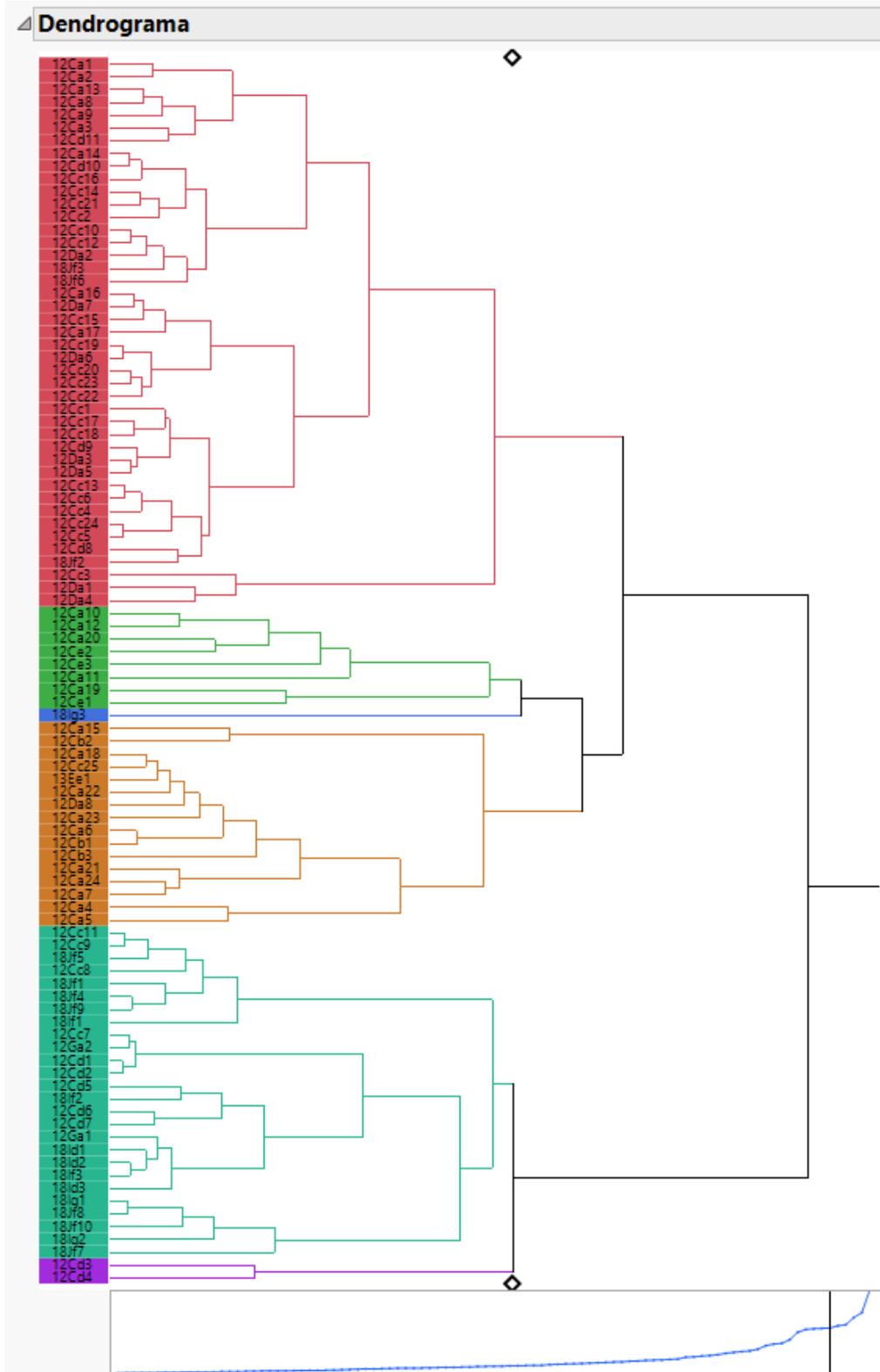


Ilustración 68.-Dendrograma para la identificación de 6 grupos multivariados.

Modelación subterránea

La modelación subterránea es una parte indispensable y muchas veces no considerada en la gestión del recurso agua, en el caso de la zona de estudio toma mucha importancia ya que como se mencionó anteriormente la cuenca cuenta con un aporte importante de agua del acuífero a través de los 52 manantiales de la zona.

Al igual que el modelo superficial lo primero que hay que seleccionar es el tipo de modelo a emplear, en este punto es muy importante tener en cuenta el uso que se le dará al modelo, el cual en este caso será para usarlo de manera conjunta con un modelo superficial y un modelo de gestión, debido a que dichos modelos son agregados se optó por usar el Software AQUIVAL 2.0 el cual utiliza el método de autovalores, el cual permite dar solución a las ecuaciones de flujo de agua en suelos por medio de la aplicación de acciones elementales lo que permite su utilización en un modelo complejo de gestión.

Preparación de archivos para el modelo

Para la alimentación del modelo es necesario preparar previamente los datos necesarios, dichos datos son:

- Generación de malla para el modelo.
Esta malla es necesaria para definir el tamaño de los elementos, así como la superficie a cubrir.
- Caracterización del modelo.
Con la malla preparada hay que ajustar los coeficientes y parámetros del modelo a la malla propuesta.
- Definición de acciones elementales.
Las acciones elementales son aquellas a las que estará sujeto el modelo, estas pueden ser recarga natural por lluvia, retornos por riego agrícola, extracciones por pozos de bombeo, etc.
- Definición de parámetros de control.
Los parámetros de control son aquellos que servirán para calibrar el modelo o como parámetros que se emplearán para la conjunción con el modelo de gestión.

Generación de malla del modelo

La generación de la malla del modelo subterráneo tiene su importancia al momento de identificar los detalles que se desean analizar, en este caso se optó por tener celdas de 6,000 metros por 6,000 metros, en una distribución de 18 columnas y 24 filas, esto nos representa un total de 10,368 km².

Es necesario en esta malla definir las celdas activas (donde existe acuífero), celdas inactivas (donde no hay modelo), celdas de nivel constante (celdas que utiliza el modelo de autovalores de base para el cálculo), celdas tipo manantial (solo salidas del acuífero) y celdas tipo río (entradas y salidas del acuífero).

Para este caso se cuenta con 231 celdas activas, 200 celdas inactivas, una celda de nivel constante, 3 celdas tipo manantial y 14 celdas tipo río (Ilustración 69).

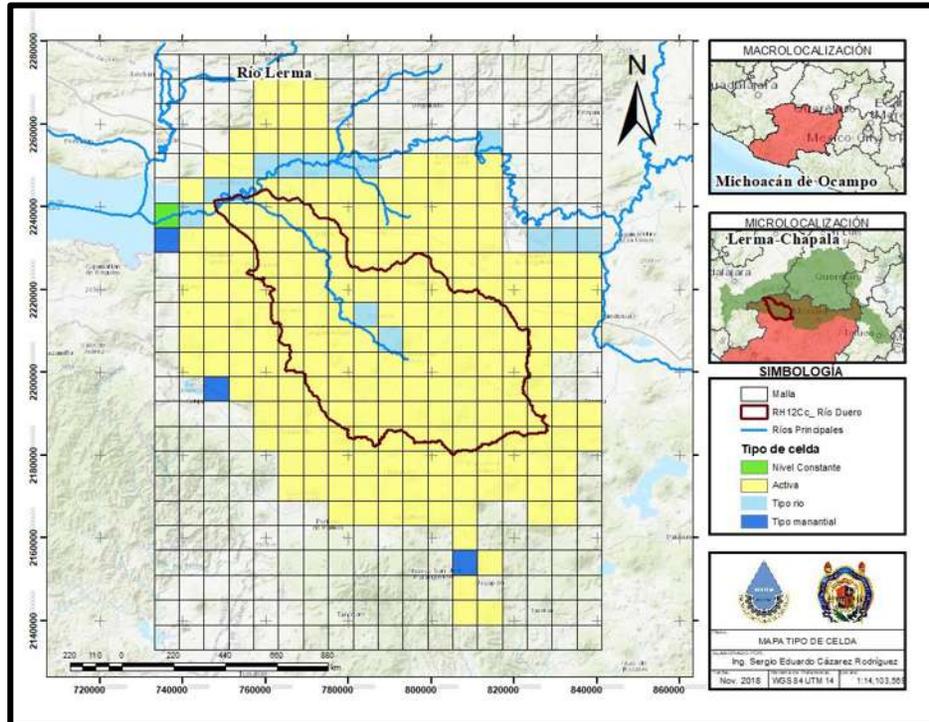


Ilustración 69.- Malla y tipo de celdas para la modelación subterránea.

Caracterización del modelo

La caracterización consiste en determinar las características físicas del modelo, para esto es necesario considerar la geología de la zona y asignar a cada celda su valor correspondiente, dichas características son la conductividad en ambas direcciones (k_x y k_y), coeficiente de almacenamiento (s) y profundidad del acuífero. Para eso se utilizó la malla de geología mostrada en la Ilustración 70 y la Tabla 32.

Tabla 32.-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 metamorfoico	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
ignea extrusiva acida	0.328	3.28	1.804	0.0001	0.00005	0.000075
ignea extrusiva basica	0.328	3.28	1.804	0.0001	0.00005	0.000075
ignea extrusiva intermedia	0.328	3.28	1.804	0.0001	0.00005	0.000075
ignea intrusiva acida	0.328	3.28	1.804	0.0001	0.00005	0.000075
ignea intrusiva intermedia	0.328	3.28	1.804	0.0001	0.00005	0.000075

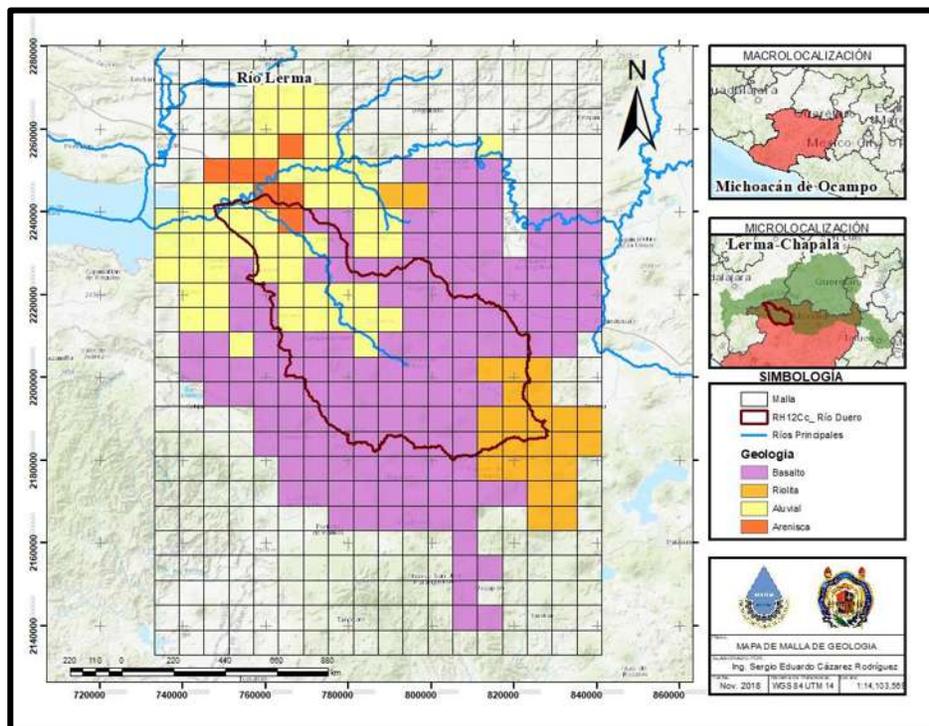


Ilustración 70.- Mapa de malla de geología de la zona de estudio.

Definición de acciones elementales.

Las acciones elementales se refieren a todas las entradas y salidas de flujo del sistema ya sea por acción natural o inducida, cada una de estas se define como un vector de valores que representan los valores históricos para el periodo e intervalos definidos, que en este caso son de 28 años y un intervalo de 1 mes. Adicionalmente se requiere una matriz de coeficientes de distribución de la acción en la malla del modelo cuya suma debe dar 1.

En este caso las acciones a considerar son aportación natural por infiltración, recargas inducidas por retornos de riego agrícola y extracción de agua a través de pozos. Estas acciones se desglosan a continuación.

Aporte natural por infiltración:

Esta acción elemental se obtiene de los resultados del modelo lluvia-escorrentamiento, el cual nos da la infiltración para cada microcuenca modelada. Debido a las limitaciones del software es necesario conjuntar cada microcuenca en las 16 subcuencas y finalmente en una sola acción elemental. Para esto se estandarizan las aportaciones de las cuencas para determinar el porcentaje de aportación de cada una de las cuencas como se muestra en la Ilustración 71 obteniendo la distribución espacial mostrada en la Ilustración 72.

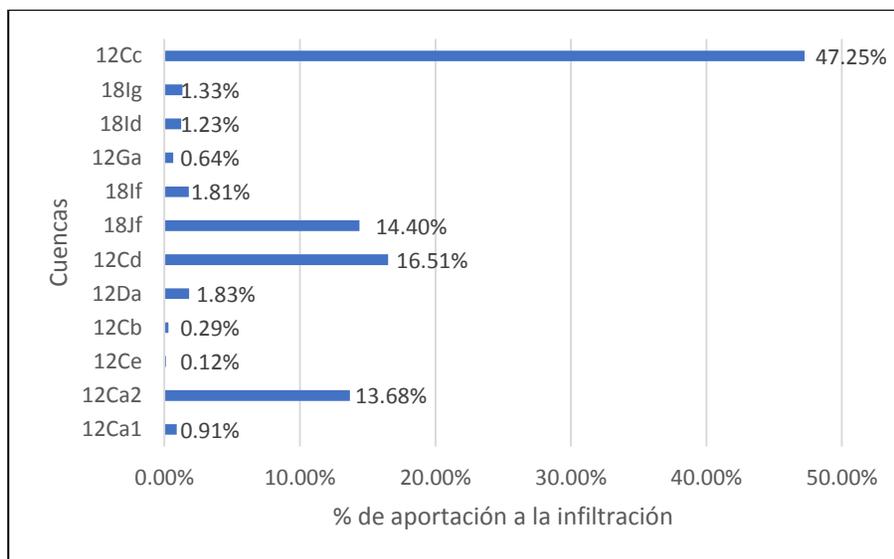


Ilustración 71.- Coeficiente de aportación a la infiltración de las subcuencas.

Finalmente se establece una distribución de este porcentaje para cada una de las celdas asociadas a cada cuenca obteniendo como matriz de esta acción la mostrada en la Ilustración 72.

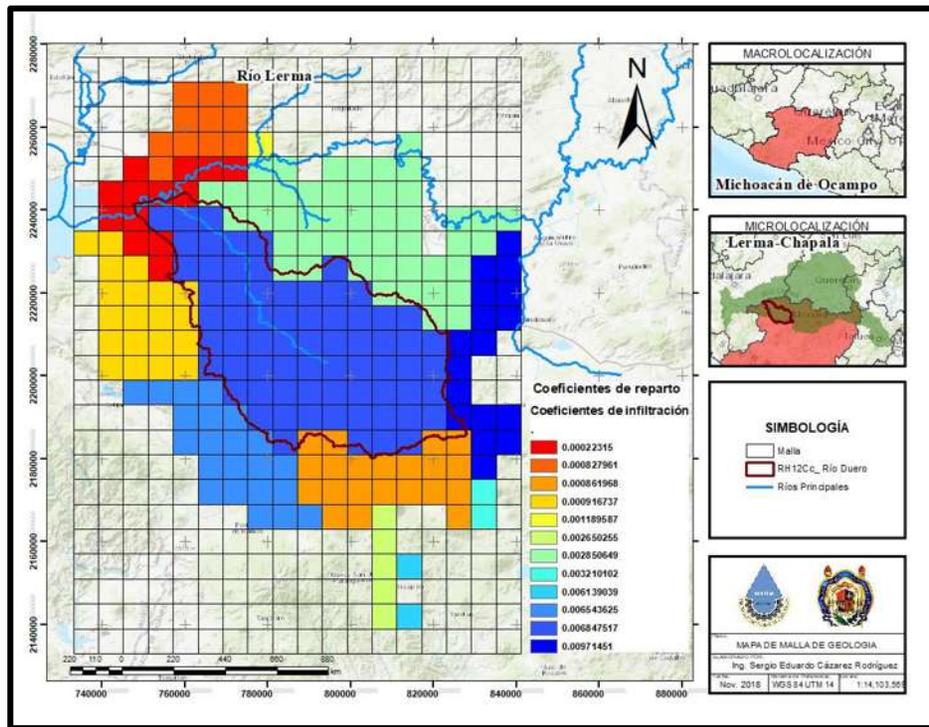


Ilustración 72.-Mapa de coeficientes de reparto para recarga natural.

Aportes por infiltración producto del riego

La agricultura a pesar de consumir agua también es un punto de recarga al acuífero, como se mencionó anteriormente la eficiencia del sistema es de aproximadamente 33.4% lo que nos indica que la mayor parte del agua se pierde en evaporación y en infiltración, para fines de este trabajo se considerará un 20% de la dotación como infiltración ya que es lo que recomienda la FAO.

La zona correspondiente a la recarga por riego serán las celdas donde se encuentra ubicado el DR061 y el DR024 considerando de esta manera 2 recargas por riego. La dotación en el caso del DR061 es la totalidad de los 4 módulos del sistema previamente determinados. En cambio, el DR024 al no cubrir la totalidad del acuífero solo se considera la parte proporcional del mismo. La distribución de la malla para este caso es la mostrada en la Ilustración 73.

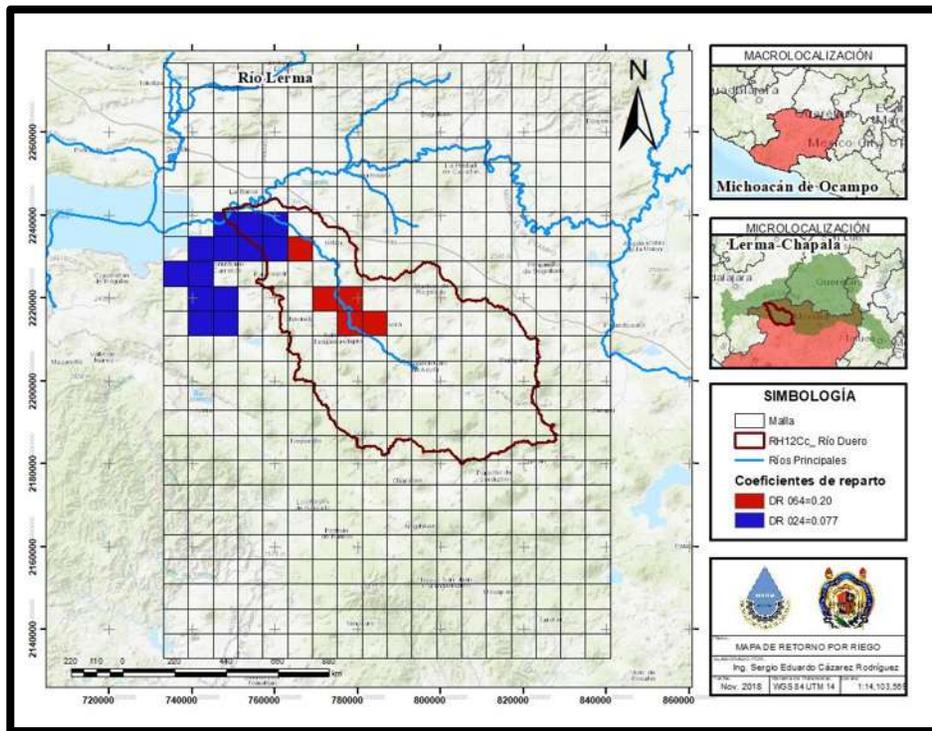


Ilustración 73.- Mapa de coeficientes de reparto para recarga por retorno de riego.

Extracción por bombeo de agua.

En algunas zonas ya se por facilidad o características de la zona, se emplea como fuente de agua la extracción directa del acuífero por medio de sistemas de bombeo, por lo que representa una acción en el mismo. Las extracciones pueden usarse tanto para abastecimiento urbano, agrícola o industrial.

Para este caso de estudio se utilizan las concesiones con las que se cuenta en el Registro Público de Derecho al Agua (REPDA) en el cual se cuenta con la distribución en función del tipo de demanda mostrado en la Ilustración 74. En total las extracciones de los pozos son de 488.87 hm³/año.

En el caso de la modelación es necesario al igual que la acción por infiltración directa realizar una matriz de coeficientes que cubra la malla del modelo, para esto se identifican todas las concesiones en cada celda del modelo y se suman para de esta manera tener el total por celda, así como su respectivo coeficiente por celda, en este caso de estudio la distribución de coeficientes es el mostrado en la Ilustración 75.

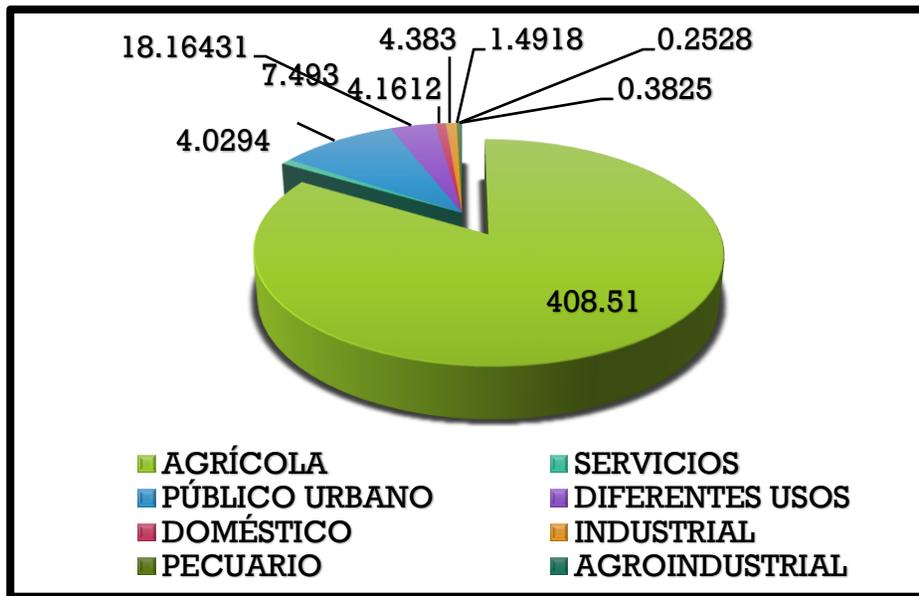


Ilustración 74.-Concesiones de agua subterránea por uso en hm³/año.

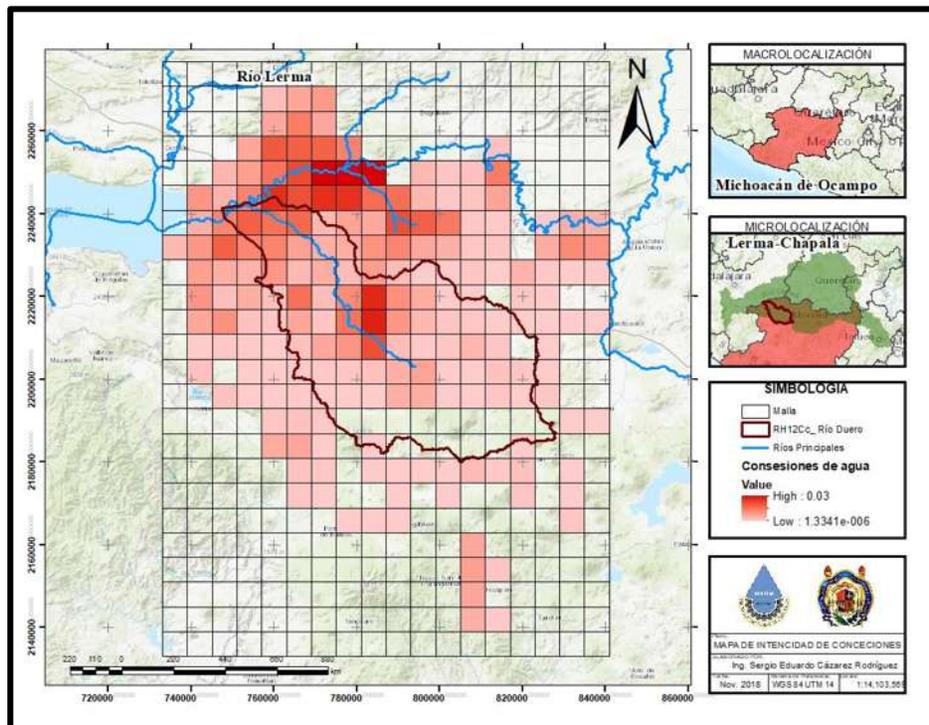


Ilustración 75.- Mapa de matriz de coeficiente de concesiones de agua subterránea.

Definición de parámetros de control.

En este caso la calibración del modelo se realizará por medio de niveles piezométricos medidos en las localidades de Purépero, Tangancícuaro, Jacona, Zamora Chavinda e

Ixtlán, ya que se cuenta con datos de profundidad del nivel estático en el periodo comprendido de febrero a octubre de 1997.

Adicionalmente se conoce que existe una interacción muy fuerte entre el agua superficial y el agua subterránea en la cuenca, por lo que en el modelo de gestión es un elemento que debe ser representado.

Como se mencionó anteriormente es bien sabido que la cuenca cuenta con 52 manantiales lo que no se conoce con certeza es si existe una interacción entre el río y el acuífero adicional a la interacción con los manantiales, debido a esto se decidió representar estos fenómenos como interacción tipo río (entra y sale agua del acuífero) ya que de existir dicha interacción se verá reflejada en caso contrario las celdas funcionarían como manantiales (solo salidas).

A manera de simplificación las celdas tipo río se propusieron en el tramo que comprende la unión del río Tlazazalca (aguas arriba de la presa Repetir) y el río Duero (antes de llegar a Zamora) ya que en este tramo se encuentran comprendidos los manantiales más importantes en la cuenca, y aguas abajo de esta zona los manantiales no son tan importantes.

Finalmente podemos observar la distribución de los parámetros de control del modelo en la Ilustración 76.

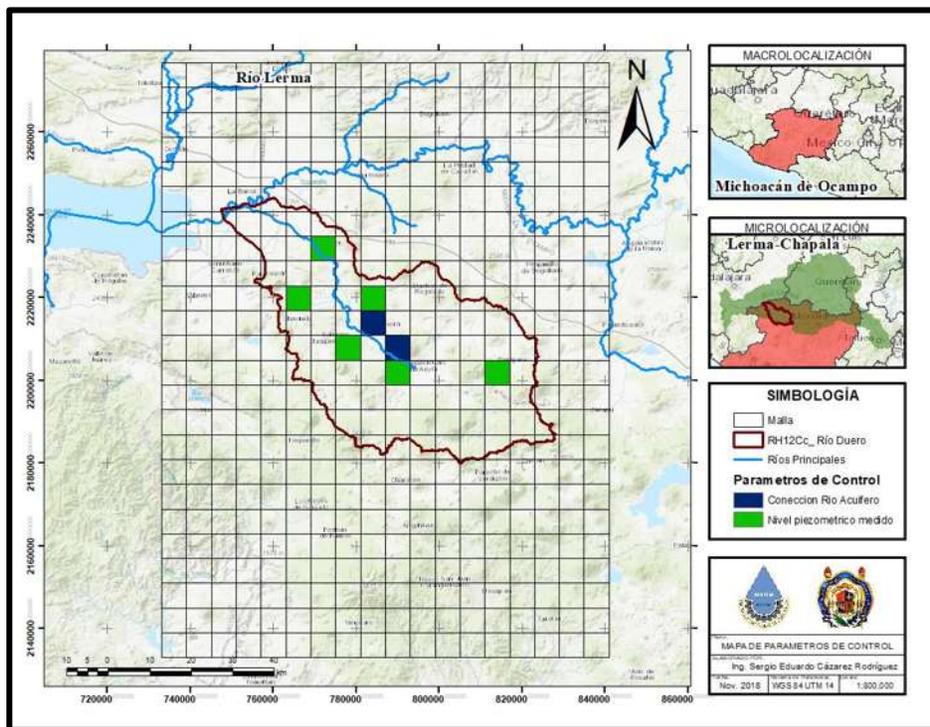


Ilustración 76.- Mapa de parámetros de control.

Calibración del modelo.

Con todos los datos antes recopilados y preparados se procede a la calibración del modelo, para esto se utilizaron como datos comparativos los registros de la dirección de flujo de los acuíferos disponibles en el REBDA tanto de niveles estáticos de los pozos como las direcciones de los acuíferos.

Cabe mencionar que el proceso de calibración en este caso es manual y lo que resulta ser más complejo y tardado que el proceso de la calibración de los modelos superficiales.

Como resultado del proceso de calibración se logró representar las direcciones de flujo como se muestra en la Ilustración 77, pero la elevación del nivel freático no logró representarse de manera correcta por lo que se optó por simplificar para fines del modelo de gestión, el modelo del acuífero por un modelo unicelular el cual será calibrado en el modelo de gestión.

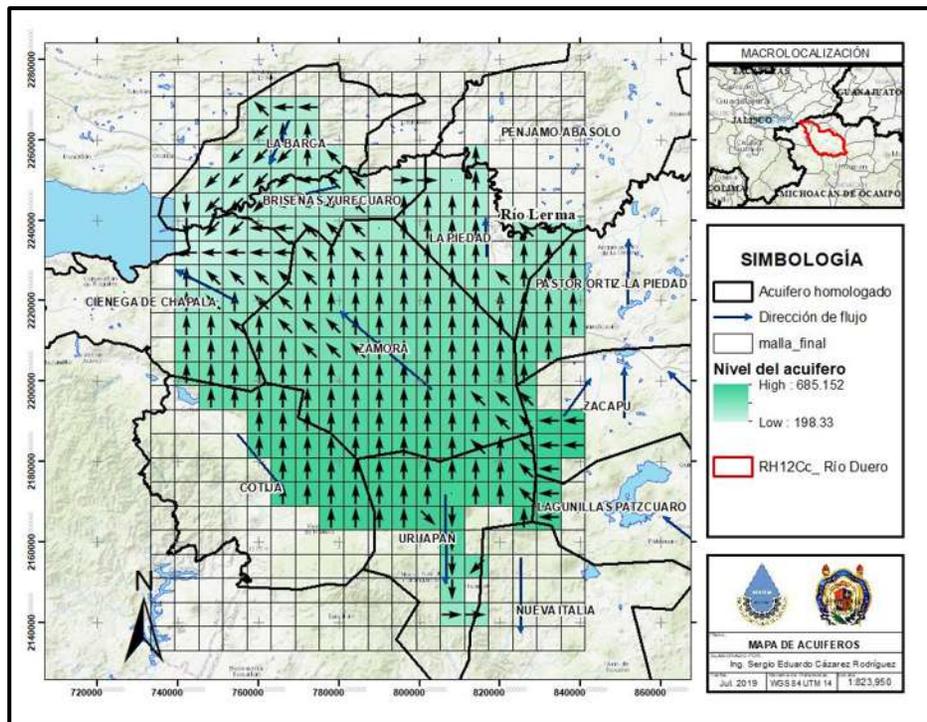


Ilustración 77.- Direcciones de flujo obtenidas en el proceso de calibración.

Modelo de gestión

En el modelo de gestión se deben considerar todas las entradas y salidas del modelo superficial y subterráneo ya calibrado, además de las demandas agrícolas y urbanas previamente determinadas y volúmenes comprometidos, en este caso al lago de Chapala, así como la infraestructura con la que se cuenta.

El software seleccionado para este trabajo es SIMGES que es un módulo del SSA AQUATOOL el cual 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 (Andreu et al., 2017).

Como fuentes de agua del modelo fungirán el modelo superficial y el modelo subterráneo. Como infraestructura es necesario considerar la presa Urepetiro y el lago de Chapala. Como demandas se consideran la de origen agrícola debidas al DR061 Y DR024, así como las demandas urbanas (en este caso las demandas industriales son despreciables debido a su baja presencia) y como consideraciones adicionales deben tomarse en cuenta la aportación adicional a la que está sometido el lago de Chapala de las cuencas aledañas y las salidas propiamente del lago de Chapala; todos estos elementos son los mostrados en el esquema de la Ilustración 78.

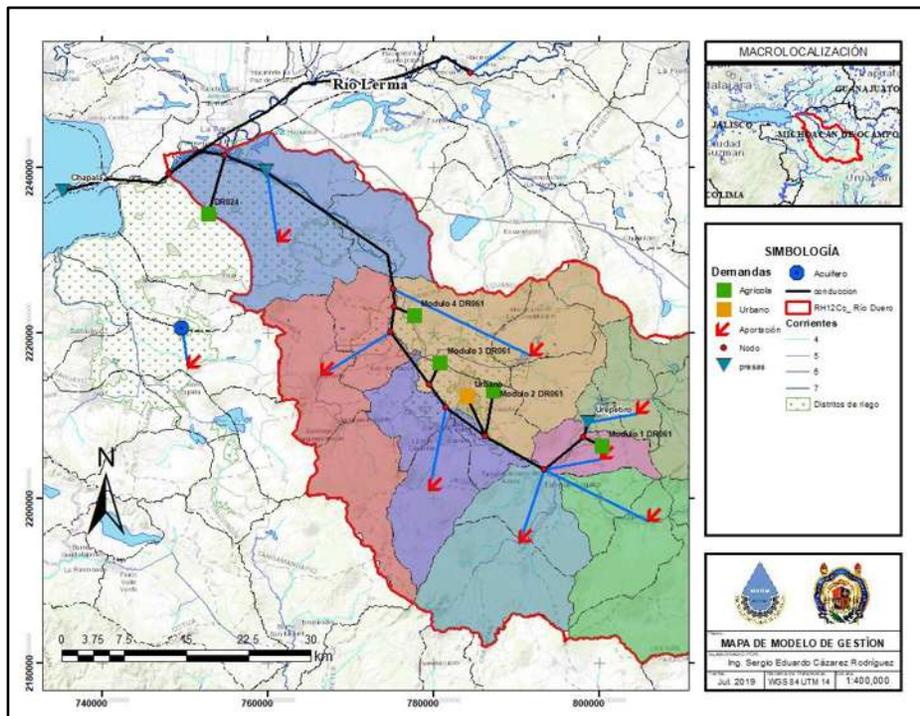


Ilustración 78.- Esquema de elementos en el modelo de gestión de la cuenca del río Duero.

Aportaciones al modelo de gestión

Como se mencionó las aportaciones al sistema provienen del modelo superficial (modelo de EVALHID) y del modelo subterráneo, para el cual se usará el modelo unicelular que será calibrado con apoyo de los niveles de las presas Urepetiro y Barraje de Ibarra.

Adicional a este elemento se agrega la estación hidrométrica de Yurécuaro que representa la aportación de las cuencas aguas arriba de la presa Urepetiro.

Demandas del sistema

Como se mencionó anteriormente solo se considerarán las demandas agrícolas y urbanas.

Para las demandas de cada uno de los módulos de riego se consideran los planes de riego de los últimos 5 años proporcionados en las oficinas de CONAGUA encargadas de la operación del distrito de riego correspondiente.

Las demandas agrícolas cuentan con 3 orígenes como se mostró anteriormente, estas son la derivación del río, la extracción por pozos y la presa Urepetiro, siendo esta última solo responsable del módulo 1 del DR061. Por otra parte, la extracción de los pozos se debe indicar en el modelo para cada una de las demandas con su respectivo volumen y asociando este al modelo subterráneo por medio de la acción elemental por bombeo de agua. La Tabla 33 muestra las demandas para cada mes y cada origen a establecerse en el modelo de gestión para el DR061.

En el caso del DR024 el agua se obtiene a partir de la presa Barraje de Ibarra y extracciones del lago de Chapala. Para el caso de esta modelación solo se considera la zona correspondiente a la presa y el resto del área de riego se engloba en las salidas del lago.

Tabla 33.- Dotación promedio mensual de los módulos de riego del DR061 en Mm3.

MESES	Modulo 1				Modulo 2			Modulo 3			Modulo 4		
	PRESA	DERIVA.	POZOS	TOTAL	DERIVA.	POZOS	TOTAL	DERIVA.	POZOS	TOTAL	DERIVA.	POZOS	TOTAL
OCTUBRE	0.76	3.06	0.88	4.69	2.13	0.61	2.73	2.56	0.64	3.20	2.19	0.38	2.57
NOVIEMBRE	1.15	4.36	1.26	6.77	3.74	0.93	4.68	3.65	0.96	4.60	2.53	0.46	2.99
DICIEMBRE	1.25	4.50	1.26	7.00	6.46	0.93	7.39	6.20	0.98	7.18	5.96	0.46	6.41
ENERO	1.22	4.02	1.26	6.49	7.92	0.87	8.79	5.72	0.98	6.70	5.05	0.45	5.50
FEBRERO	1.21	4.19	1.26	6.66	7.24	0.80	8.04	5.43	0.98	6.41	5.87	0.45	6.32
MARZO	1.10	4.38	1.24	6.73	7.32	1.13	8.45	6.09	0.98	7.07	6.19	0.45	6.65
ABRIL	1.11	4.36	1.03	6.50	11.06	1.15	12.21	6.35	1.01	7.36	5.76	0.43	6.19
MAYO	1.44	5.01	0.45	6.90	7.61	0.63	8.24	7.93	0.44	8.38	15.81	0.25	16.06
JUNIO	0.35	1.32	0.12	1.79	2.90	0.45	3.36	0.97	0.24	1.21	1.32	0.17	1.49
JULIO	0.00	0.00	0.00	0.00	1.04	0.39	1.43	0.00	0.05	0.05	0.75	0.15	0.90
AGOSTO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.95	0.38	1.33	0.00	0.02	0.02	0.50	0.11	0.62
SEPTIEMBRE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.29	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TOTAL	9.59	35.19	8.75	53.53	58.67	8.56	67.23	44.90	7.29	52.19	51.94	3.76	55.70

Las demandas urbanas son entre todas las demandas las de mayor importancia, y para cuantificarlas es necesario determinar la población en la zona de estudio. Con el objetivo de simplificar dicho procedimiento se agruparon las localidades por municipios. El registro de población histórico se tomó de la información de los censos y conteos por parte de INEGI obteniendo como resultado las poblaciones mostradas en la Tabla 34.

Para la determinación de la población futura se utilizó la NT-011-CNA-2001 “Método de proyección de población” publicado en junio del 2001. Esta normativa establece como métodos de proyección de población los siguientes:

- Proyección lineal de población.
- Proyección Exponencial de población.
- Proyección Logarítmica de población.

Tabla 34.- Registro histórico de población obtenido de la base de datos de INEGI.

Nombre del municipio	Clave	Registro Histórico								
		1950	1960	1970	1980	1990	1995	2000	2005	2010
Zamora	108	37,676	53,968	82,943	113,474	144,899	160,079	161,918	170,748	184,197
Tangancícuaro	85	18,838	25,257	29,528	30,947	33,835	33,815	32,821	30,052	32,884
Cherán	24	5,049	7,267	10,239	13,267	14,870	20,786	21,706	18,156	18,230
Chilchota	25	9,739	13,866	17,363	17,620	26,349	24,810	23,221	19,478	21,515
Purépero	70	9,542	11,744	12,826	16,133	14,674	88,581	84,946	16,523	16,837
Tangamandapio	84	9,409	12,559	14,396	16,503	21,261	22,151	26,245	24,267	27,018
Jacona	43	9,496	14,245	26,078	35,247	40,546	14,959	14,393	60,029	62,413
Tlazazalca	94	7,607	10,145	11,579	11,735	12,173	9,294	8,830	6,776	7,296
Chavinda	23	7,549	10,948	12,197	12,354	12,472	13,369	13,974	11,632	13,711
Ixtlán	42	11,125	12,662	13,897	14,870	15,510	12,591	13,260	12,794	13,606
Pajacuarán	62	12,674	15,686	17,493	20,206	19,678	17,161	18,804	7,722	9,141
Briseñas de Matamoros	11		7,746	7,454	8,487	9,478	9,831	9,641	9,560	11,754
Vista Hermosa	105	16,884	14,277	14,329	15,527	18,209	18,651	17,687	17,412	18,912
totales		155,588	210,370	270,322	326,370	383,954	446,078	447,446	405,149	437,514

Se efectuó la proyección de población por todos los métodos y se realizó la comparativa mostrada en la gráfica de la Ilustración 79.

Es importante señalar que el método se utilizó para cada población, debido a esto la proyección lineal y tasa de crecimiento no representan líneas rectas.

De lo anterior se puede observar que el ajuste lineal representa de mejor manera el periodo histórico, es por esto que fue el método elegido para la proyección de la población.

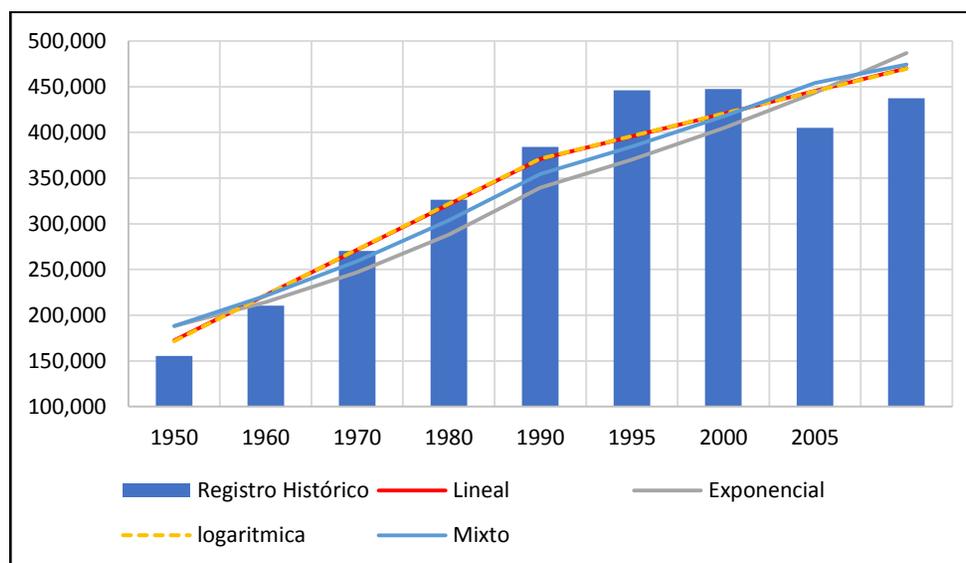


Ilustración 79.- Comparativa de métodos de proyección de población.

Para establecer la población proyecto primero fue necesario alcanzar la población actual (2019) para posteriormente proyectar 2 años a futuro, este periodo se propuso ya que la gestión de recursos hidráulicos se realiza a corto plazo; los resultados de esta proyección son los mostrados en la Tabla 35.

Tabla 35.- Proyección de población a fecha actual y 2 años a futuro.

Municipio	Clave	2019	2020	2021
Zamora	108	273,440	280,780	288,316
Tangancicuaro	85	38,025	38,311	38,599
Cherán	24	28,768	29,432	30,113
Chilchota	25	28,718	29,082	29,452
Purépero	70	43,347	44,281	45,236
Tangamandapio	84	33,291	33,874	34,467
Jacona	43	53,121	54,281	55,467
Tlazazalca	94	8,296	8,269	8,241
Chavinda	23	15,105	15,211	15,318
Ixtlán	42	14,164	14,189	14,215
Pajacuarán	62	12,181	12,116	12,051
Briseñas de Matamoros	11	11,552	11,641	11,730
Vista Hermosa	105	19,028	19,097	19,166
Total		579,036	590,564	602,371

Finalmente para determinar la demanda de agua se utiliza el libro 4 del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento titulado “Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado” publicado por CONAGUA, el cual establece la demanda de agua en función de la temperatura y de la clase socioeconómica (Tabla 36).

Tabla 36.- Consumo per cápita por clase socioeconómica.

Consumo doméstico per cápita (l/hab/día)	Clase socioeconómica
250	Residencial
195	medio
100	Popular

En este caso se consideró una distribución de 15% popular, 50% medio y 35% residencial, con base en datos medios de Michoacán tomados por INEGI en el 2012. Como resultado de lo anterior se tienen los volúmenes mostrados en la Tabla 37.

Tabla 37.- Demandas de agua producto de la población actual y población proyecto.

Municipio	Población			Demanda 2019 hm ³ /mes	Demanda 2020 hm ³ /mes	Demanda 2021 hm ³ /mes
	2019	2020	2021			
Zamora	273,440	280,780	288,316	1,640.64	1,684.68	1,729.90
Tangancicuaro	38,025	38,311	38,599	228.15	229.87	231.59
Cherán	28,768	29,432	30,113	172.61	176.59	180.68
Chilchota	28,718	29,082	29,452	172.31	174.49	176.71
Purépero	43,347	44,281	45,236	260.08	265.69	271.42
Tangamandapio	33,291	33,874	34,467	199.75	203.24	206.80
Jacona	53,121	54,281	55,467	318.73	325.69	332.80
Tlazazalca	8,296	8,269	8,241	49.78	49.61	49.45
Chavinda	15,105	15,211	15,318	90.63	91.27	91.91
Ixtlán	14,164	14,189	14,215	84.98	85.13	85.29
Pajacuarán	12,181	12,116	12,051	73.09	72.70	72.31
Briseñas de Matamoros	11,552	11,641	11,730	69.31	69.85	70.38
Vista Hermosa	19,028	19,097	19,166	114.17	114.58	115.00
total	579,036	590,564	602,371	3,474.22	3,543.38	3,614.23

Para evitar duplicar demandas se determinó la parte que toma agua de los registros de concesión del REPDA; como resultado de este proceso se tienen las demandas mostradas en la Tabla 38.

Tabla 38.-Tabla de definición de origen del suministro de agua de origen urbano.

Municipio	Volumen demandado en hm ³ /año	Volumen concesionado de pozos en hm ³ /año	Aporte superficial en hm ³ /año
Zamora	1.73	0.11	1.62
Tangancicuaro	0.23	2.13	0.00
Cherán	0.18	0.00	0.18
Chilchota	0.18	0.03	0.14
Purépero	0.27	0.57	0.00
Tangamandapio	0.21	0.48	0.00
Jacona	0.33	0.73	0.00
Tlazazalca	0.05	0.29	0.00
Chavinda	0.09	0.96	0.00
Ixtlán	0.09	1.82	0.00
Pajacuarán	0.07	0.45	0.00
Briseñas de Matamoros	0.07	0.00	0.07
Vista Hermosa	0.11	0.24	0.00
total	3.61	7.82	2.02

Elementos hidráulicos del modelo.

Ya que se tienen los elementos de entrada al modelo es necesario incorporar los elementos hidráulicos que son aquellos elementos estructurales que permiten la gestión del recurso hidráulico. Para estos elementos es necesario ingresar las curvas características que se mostraron anteriormente. Adicionalmente la evaporación del embalse y los niveles mínimos, máximos y objetivos para cada mes, estos datos se determinan a partir de la información disponible en BANDAS.

En este punto es importante mencionar que se identificó un cambio en la operación del sistema en 1980 afectando el comportamiento del lago de Chapala, este cambio es apreciable en la estación hidrométrica Yurécuaro y en las salidas del lago de Chapala. Lo anterior se puede apreciar en la Ilustración 80.

Este cambio lo puede generar la construcción de una presa, o generación de una nueva zona re riego, para este caso no fue posible identificar la fuente del cambio, pero se cuentan con los elementos suficientes para modelarlo.

Para esto es necesario realizar el modelo de gestión y el de riesgo en 2 periodos para posteriormente juntar los resultados. Estos dos periodos de modelación significan que se debe contar con una demanda diferente aguas abajo y nivel mínimo, objetivo y máximo para cada periodo.

A continuación se muestran los datos utilizado para la modelación.

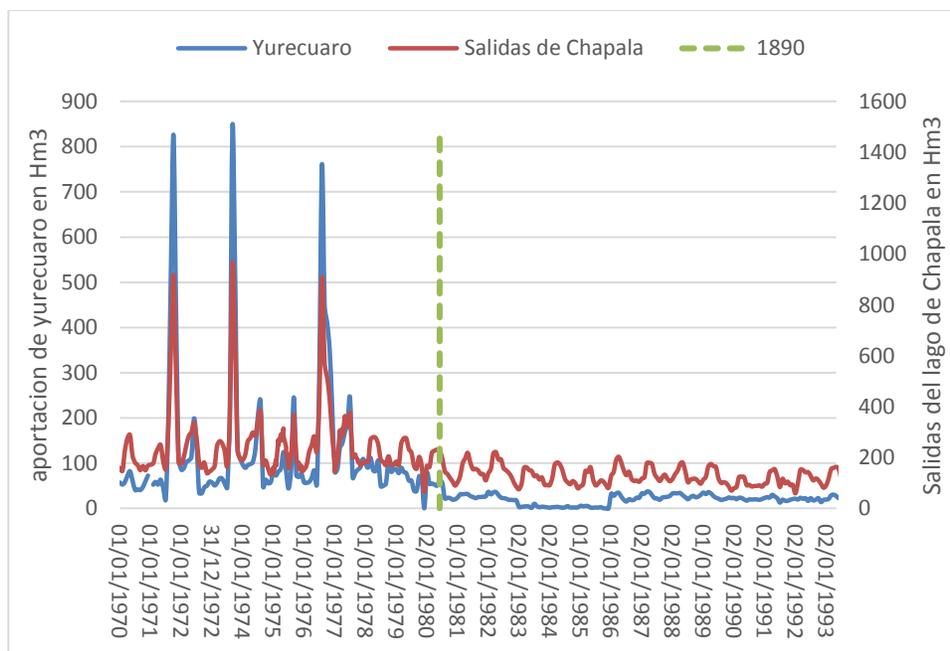


Ilustración 80.- Evidencia del cambio de operación en 1980 en la cuenca Lerma-Chapala.

Presa Urepetiro.

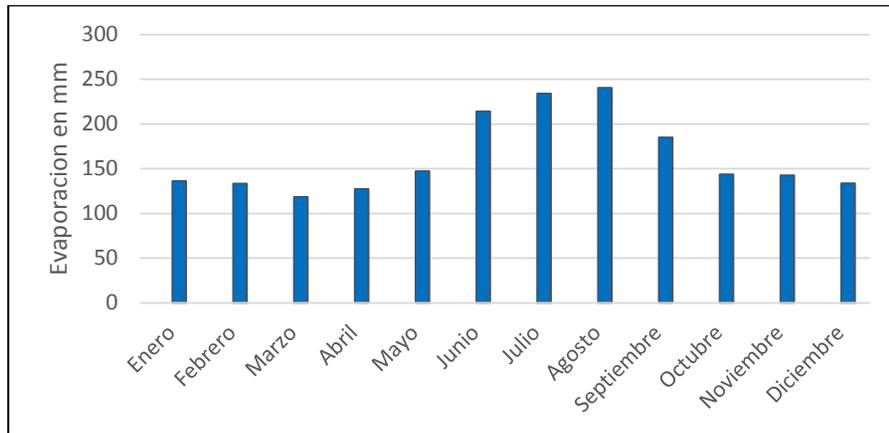


Ilustración 81.- Evaporación promedio mensual en mm de la presa Urepetiro.

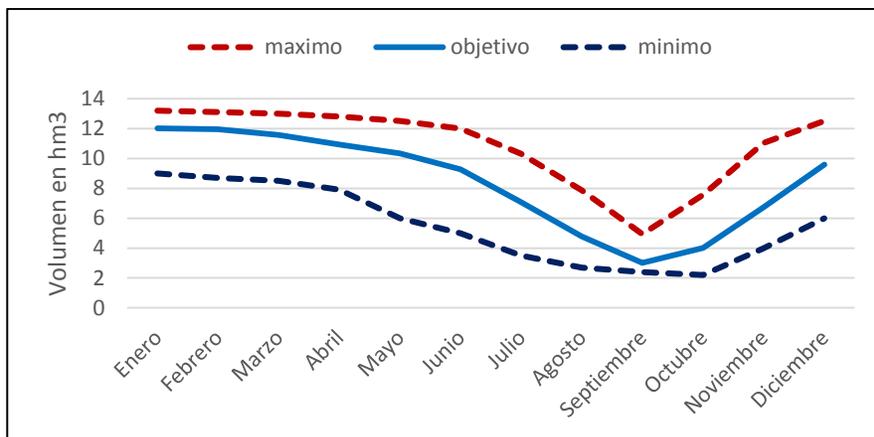


Ilustración 82.- Nivel máximo, mínimo y objetivo para la presa Urepetiro.

Presa Barraje de Ibarra.

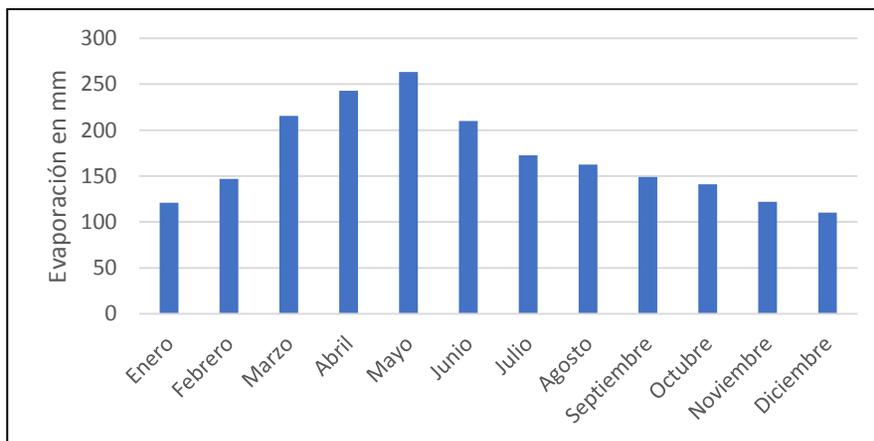


Ilustración 83.- Evaporación promedio mensual para la presa de Barraje de Ibarra.

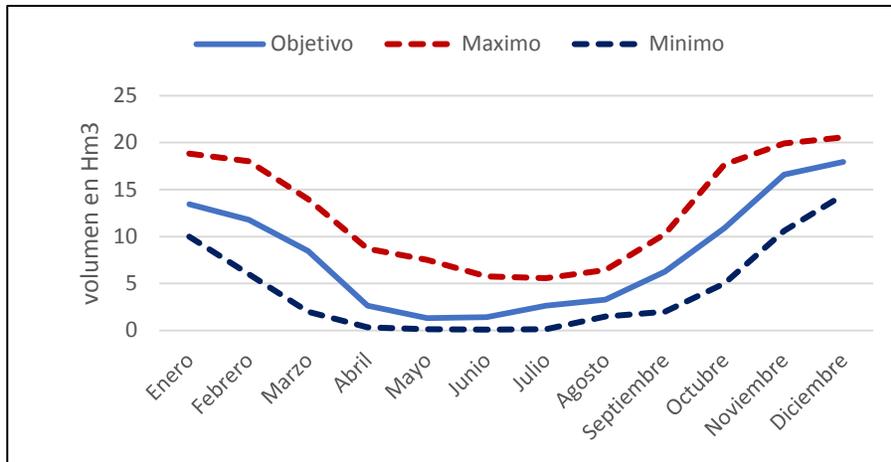


Ilustración 84.- Nivel máximo, mínimo y objetivo para la presa Barraje de Ibarra.

Lago de Chapala.

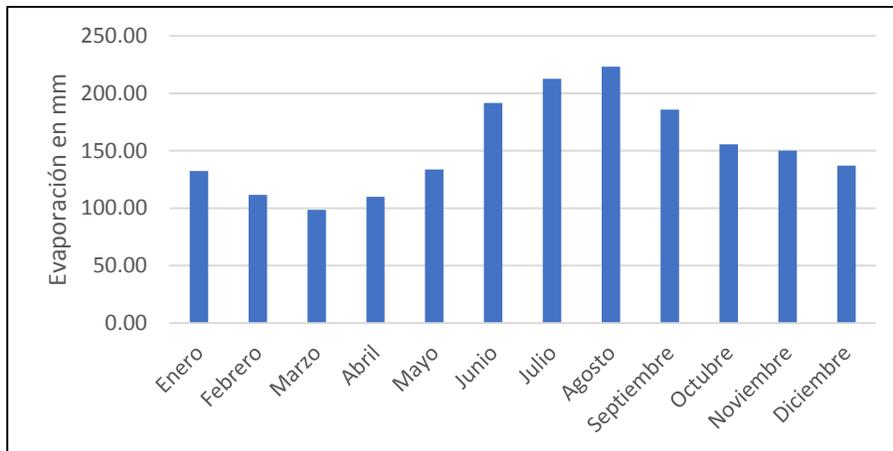


Ilustración 85.- Evaporación promedio mensual para el lago de Chapala.

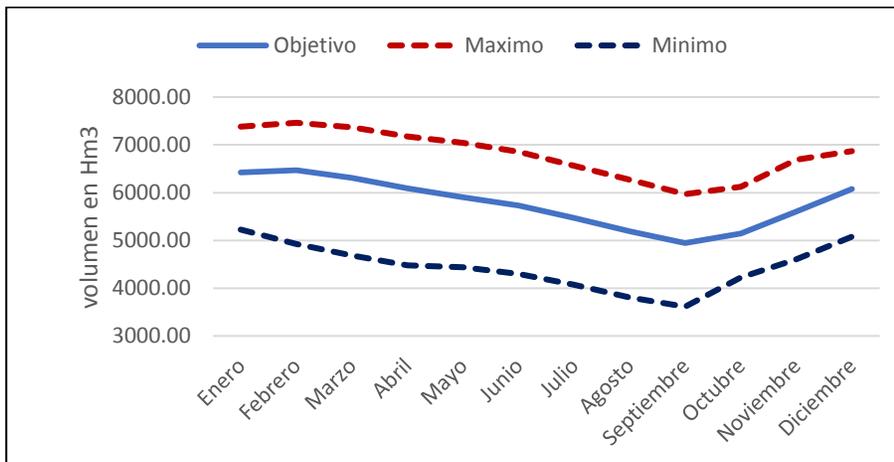


Ilustración 86.- Nivel máximo, mínimo y objetivo antes de 1980 para el lago de Chapala.

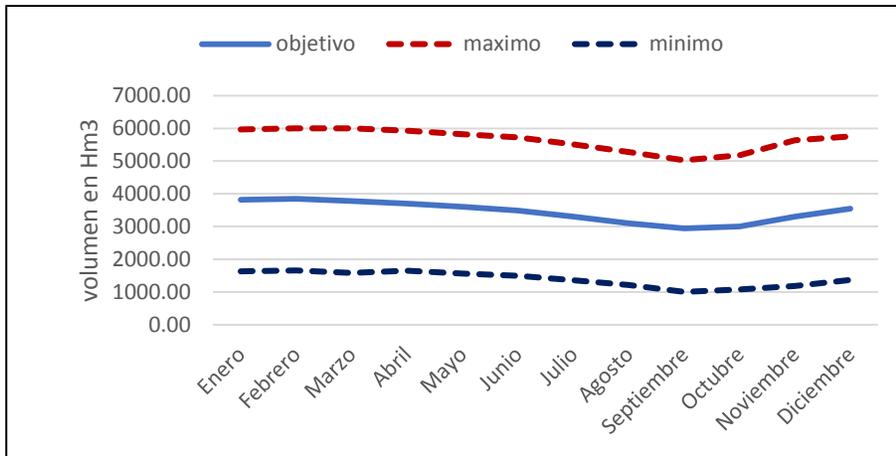


Ilustración 87.- Nivel máximo, mínimo y objetivo después de 1980 para el lago de Chapala.

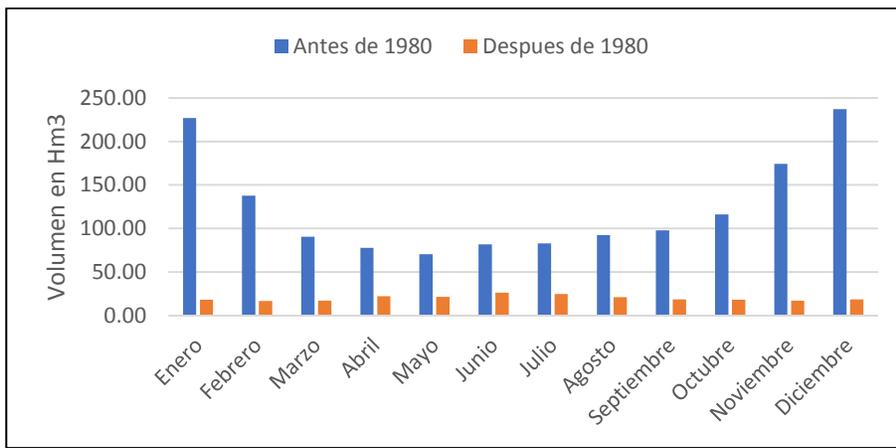


Ilustración 88.- Demandas aguas abajo del lago de Chapala.

Resumen de características

En la Tabla 39 se muestra un resumen de las características empleadas para realizar el modelo de gestión.

Tabla 39.- Resumen de características de los embalses empleadas en la modelación de la gestión

ELEMENTO	CARACTERÍSTICA	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	
Urepetiro	Volumen	Minimo	9.00	8.70	8.50	7.90	6.00	5.00	3.50	2.70	2.40	2.20	4.00	6.00
		Objetivo	12.01	11.97	11.58	10.94	10.35	9.27	7.08	4.79	3.01	4.01	6.75	9.58
		Maximo	13.20	13.10	13.00	12.80	12.50	12.00	10.32	7.86	4.94	7.57	11.03	12.50
	Evaporacion	136.22	133.30	118.19	127.13	147.27	214.17	233.92	240.41	184.99	143.44	142.48	133.57	
Barraje de Ibarra	Volumen	Minimo	10.00	6.00	2.00	0.33	0.14	0.09	0.14	1.49	2.00	5.00	10.59	14.43
		Objetivo	13.43	11.78	8.48	2.63	1.33	1.42	2.63	3.28	6.25	10.91	16.60	17.96
		Maximo	18.84	18.00	14.00	8.72	7.53	5.74	5.57	6.42	10.25	17.67	19.91	20.56
	Evaporacion	120.87	146.88	215.42	242.82	263.37	209.77	172.46	162.40	148.80	141.10	121.91	110.05	
Lago de Chapala antes de 1980	Volumen	Minimo	5227.30	4927.50	4683.32	4481.96	4439.48	4301.60	4071.70	3807.30	3615.27	4227.40	4609.00	5076.25
		Objetivo	6423.20	6466.30	6308.30	6090.97	5906.51	5730.16	5473.74	5194.79	4945.61	5142.86	5604.32	6073.33
		Maximo	7379.72	7461.22	7368.08	7174.00	7042.00	6854.92	6560.60	6267.20	5968.71	6121.13	6685.92	6865.94
	Evaporacion	132.38	111.54	98.62	109.80	133.62	191.77	212.77	223.25	185.78	155.68	150.04	136.95	
	Demandas aguas abajo	64.00	54.00	58.00	70.00	71.86	90.00	89.00	82.00	65.00	64.50	58.00	70.00	
Lago de Chapala despues de 1980	Volumen	Minimo	1632.10	1656.14	1576.00	1648.13	1560.40	1490.51	1355.60	1207.30	1001.42	1074.40	1185.60	1363.10
		Objetivo	3819.84	3845.49	3774.12	3702.96	3601.45	3491.24	3299.00	3096.48	2939.01	3001.23	3300.10	3544.50
		Maximo	5966.11	5999.88	5999.88	5932.34	5820.16	5720.01	5508.57	5275.30	5024.16	5177.03	5630.98	5753.39
	Evaporacion	132.38	111.54	98.62	109.80	133.62	191.77	212.77	223.25	185.78	155.68	150.04	136.95	
	Demandas aguas abajo	17.98	16.72	17.10	22.15	21.34	26.14	24.82	21.22	18.39	18.18	17.21	18.37	

Calibración del modelo de gestión

Una vez que se cuenta con todos los elementos del modelo de gestión nos queda pendiente el acuífero ya que este como se mencionó anteriormente no fue posible calibrarlo usando el método de autovalores, por lo que se considera como un modelo unicelular en el modelo de gestión el cual requiere un volumen inicial y un coeficiente de interacción.

Para la calibración de dicho modelo se utilizaron los registros históricos del nivel en la presa de Urepetiro, presa Barraje de Ibarra y el propio lago de Chapala. En esta ocasión los parámetros que se fueron modificando son las condiciones iniciales del acuífero, el coeficiente de interacción río-acuífero, y las zonas donde existe interacción río-acuífero, como resultado de la calibración se tienen las

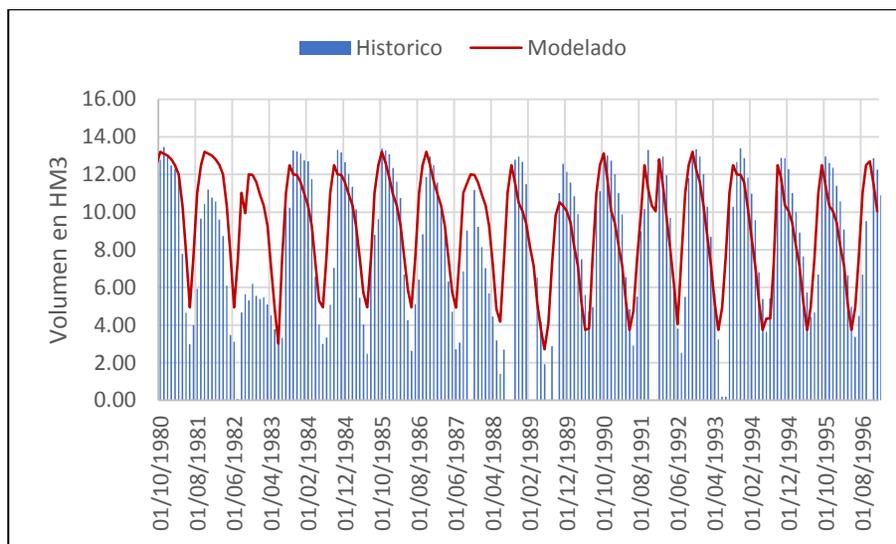


Ilustración 89.- Comparativa entre medido y modelado en la presa Urepetiro para el modelo de gestión.

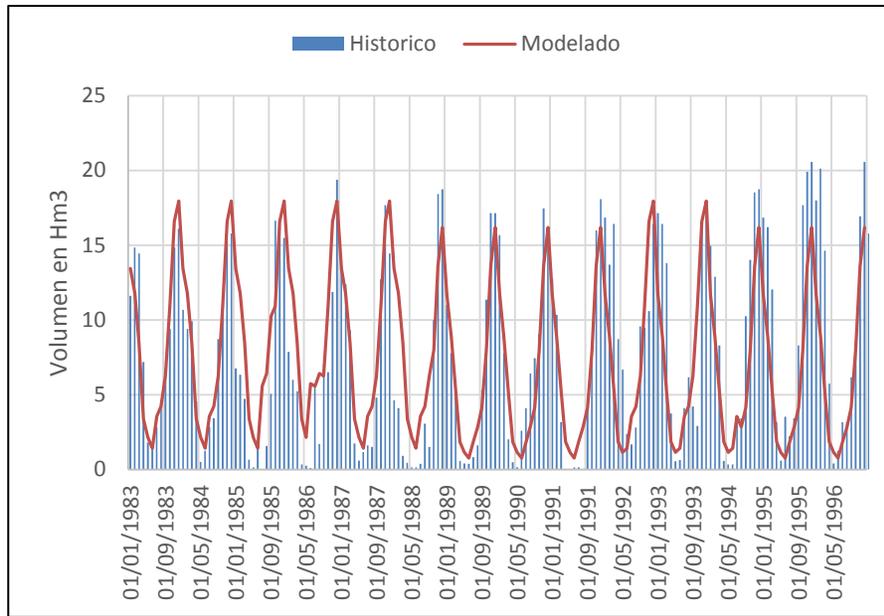


Ilustración 90.- Comparativa entre medido y modelado en la presa Barraje de Ibarra para el modelo de gestión.

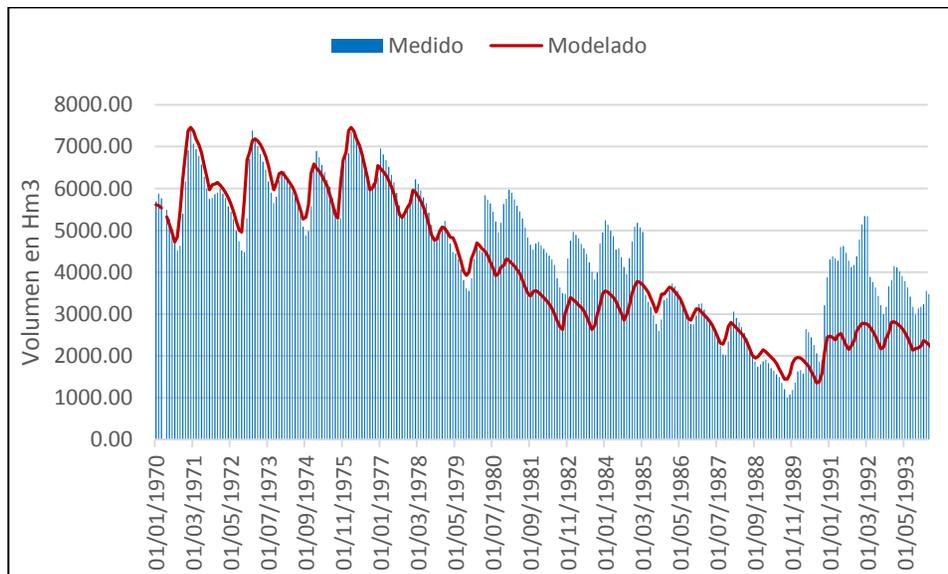


Ilustración 91- Comparativa entre medido y modelado en el lago de Chapala para el modelo de gestión.

Finalmente la estructura del modelo de gestión es la mostrada en la Ilustración 92, contando con 2 conexiones río-acuífero una antes de la presa Urepetiro y otra después. Los parámetros del acuífero son un volumen inicial de 2,700 Hm³ y coeficiente de integración río-acuífero igual a 0.023, estos parámetros son iguales para ambos periodos de modelación (antes de 1980 y después de 1980).

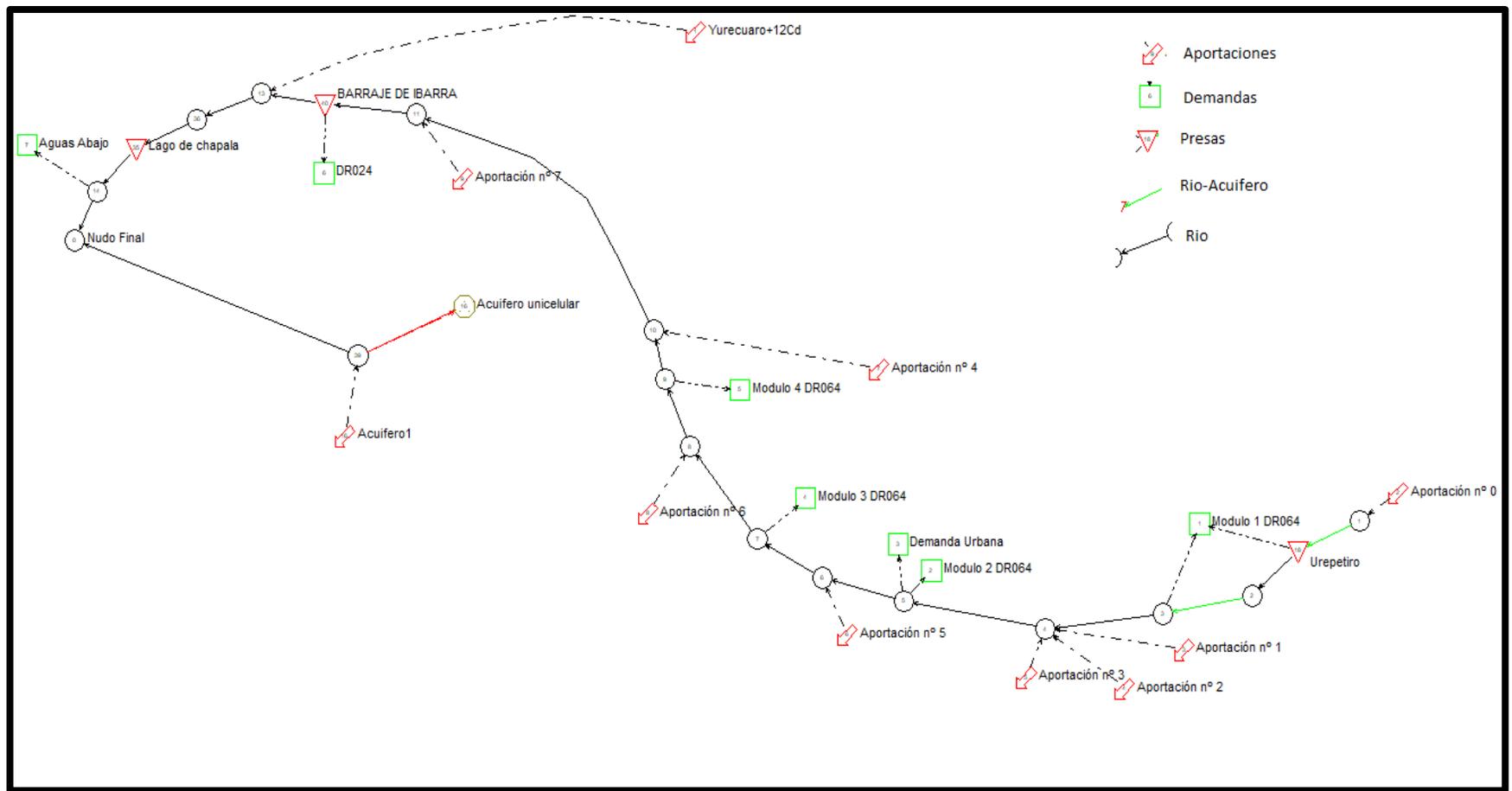


Ilustración 92.- Estructura final del modelo de gestión.

Generación de series sintéticas.

Para la generación de las series sintéticas de escurrimiento se empleó el software MASHWIN 2.0 el cual permite el modelado de series estocásticas de escurrimiento mensual, destinado al estudio de series de aportación a sistemas hidráulicos (Andreu *et al.*, 2017), entre sus características cuenta con la capacidad de:

- Realizar análisis de las series temporales de escurrimiento.
- Definir parámetros de sequía.
- Ajuste de series de Fourier.
- Generar modelos autorregresivos AR(1) y AR(2), así como modelos autorregresivos de media móvil ARMA(1,1).
- Realizar modelación estocástica multivariada.

Para este caso se analizó la serie de escurrimiento generada del modelo de EVALID en la estación hidrométrica de la 445URE para definir el modelo a emplear. Los modelos analizados fueron:

- AR(1) con y sin uso de series de Fourier (SFAR(1) y SE(AR(1))).
- AR(2) con y sin uso de series de Fourier (SFAR(2) y SE(AR(2))).
- ARMA(1,1) con y sin uso de series de Fourier (SFARMA(2) y SE(ARMA(2))).

Para verificar el ajuste de cada uno de los modelos se compararon los estadísticos de cada uno con los estadísticos de la serie original, de este procedimiento se determinó que el mejor modelo es el AR(1) sin series de Fourier. Esto se puede observar en las gráficas de error mostradas en la Ilustración 93 e Ilustración 94. La gráfica de error en el sesgo no se agrego ya que no muestra diferencias significativas entre los modelos analizados.

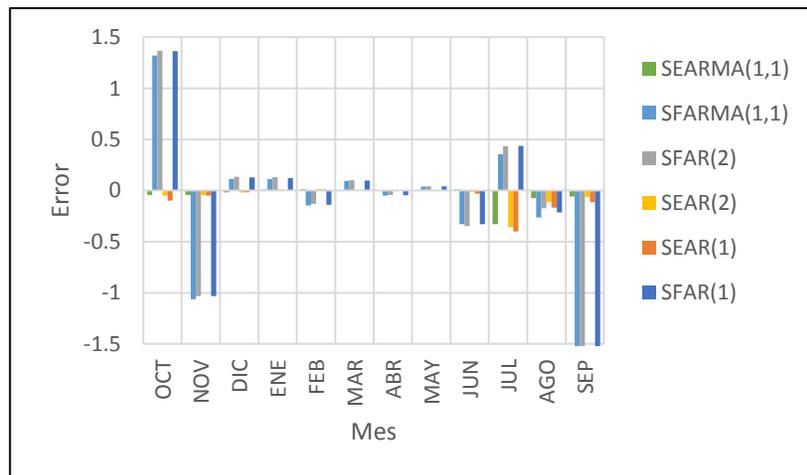


Ilustración 93.- Gráfica de error en la media de las series sintéticas.

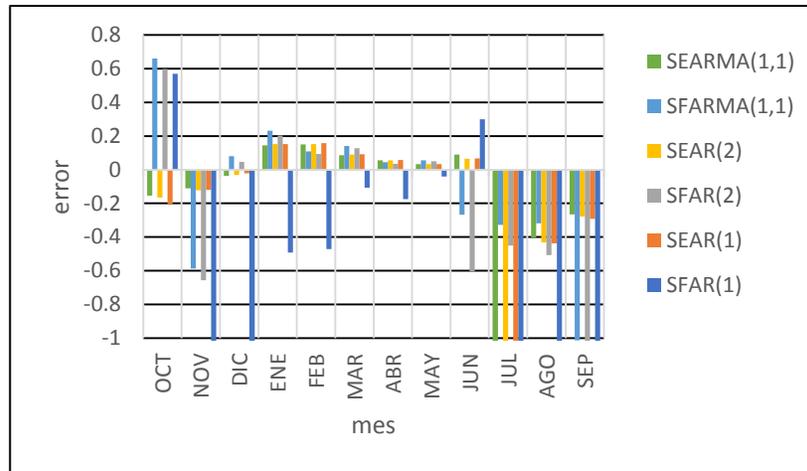


Ilustración 94.- Gráfica de error en la desviación típica de las series sintéticas.

Una vez determinado el mejor modelo se procede a la generación de las series sintéticas para las cuencas consideradas en el modelo de gestión. Que en este caso corresponden a las 8 aportaciones en el modelo de gestión, para lo cual es necesario primeramente determinar los grupos para el análisis multivariado para desagregación espacial por el modelo de Lane.

Para este fin hay que revisar la matriz de correlación cruzada mostrada en la Tabla 40, donde es posible determinar 3 grupos multivariados en los cuales la aportación 0, 1 y Yurécuaro no cuentan con una alta correlación por lo que se juntan en un mismo grupo multivariado.

Tabla 40.- Matriz de correlación cruzada entre aportaciones.

	Apo. 0	Apo. 1	Apo. 2	Apo. 3	Apo. 4	Apo. 5	Apo. 6	Apo. 7	Yurécuaro
Apo. 0	1	0.11	0.02	0.03	0.01	0.02	-0.01	0.01	0.19
Apo. 1	0.11	1	0.67	0.73	0.71	0.73	0.71	0.74	0.05
Apo. 2	0.02	0.67	1	0.94	0.66	0.90	0.70	0.63	-0.02
Apo. 3	0.03	0.73	0.94	1	0.72	0.96	0.75	0.70	0.00
Apo. 4	0.01	0.71	0.66	0.72	1	0.70	0.98	0.97	0.03
Apo. 5	0.02	0.73	0.90	0.96	0.70	1	0.73	0.69	0.01
Apo. 6	-0.01	0.71	0.70	0.75	0.98	0.73	1	0.95	-0.01
Apo. 7	0.01	0.74	0.63	0.70	0.97	0.69	0.95	1	0.02
Yurécuaro	0.19	0.05	-0.02	0.00	0.03	0.01	-0.01	0.02	1

Ya que se cuenta con los grupos multivariados se procede a la generación de las series sintéticas con apoyo del software Maswin 2.0.

Modelo de gestión de sequía operativa

Lo primero a retomar antes de ensamblar el modelo de gestión de sequía operativa son las reglas de operación, estas no se consideran en el modelo de gestión ya que comienza su aplicación a partir del año 2004. Estas reglas no pueden aplicarse de forma directa como se proporcionaron por los DR ya que tienen 2 condiciones y se aplican sobre la dotación total anual, por lo que es necesario realizar una adaptación para su aplicación en el modelo de gestión. Para esto se tomaron en cuenta las siguientes dos consideraciones.

1.- Separar la regla de operación del sistema en 2 reglas distintas:

En el software Aquatool solo es posible agregar un elemento (aportación o embalse) del que depende la aplicación de una regla de operación. Pero en este caso se cuenta con 2 elementos (Lago de Chapala y Aportación Yurécuaro) por lo que es necesario representar esta única regla en dos, cuya acción conjunta nos represente lo mismo bajo el principio de superposición.

2.- Segregación de la regla para su aplicación al principio de cada mes:

El software Aquatool revisa la aplicación de la regla al inicio de cada mes, en cambio la regla de operación del sistema revisa el estado de embalse y las aportaciones el último día de diciembre por lo que es necesario determinar la representatividad del nivel del lago para cada mes con respecto al mes de noviembre (Ilustración 95), y el porcentaje que representa de la aportación total cada mes en el caso de la aportación de Yurécuaro (Ilustración 96).

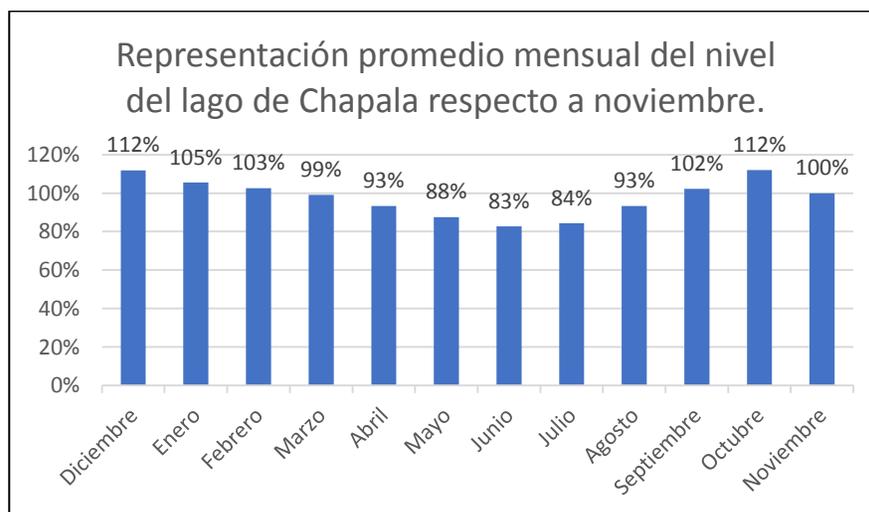


Ilustración 95.- Representación promedio del nivel del lago de Chapala para cada mes con respecto a noviembre.

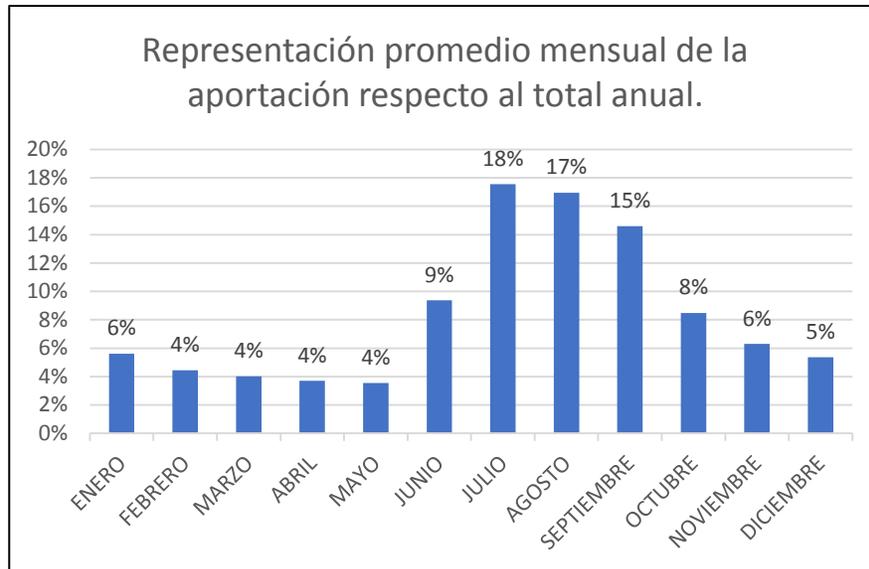


Ilustración 96.- Porcentaje promedio de aportación mensual en la estación hidrométrica Yurécuaro.

Como resultado de este análisis se tienen las reglas de operación mostradas en la Ilustración 97 e Ilustración 98, en función del volumen en el lago al inicio del mes para la aplicación en el DR061 y DR064 respectivamente.

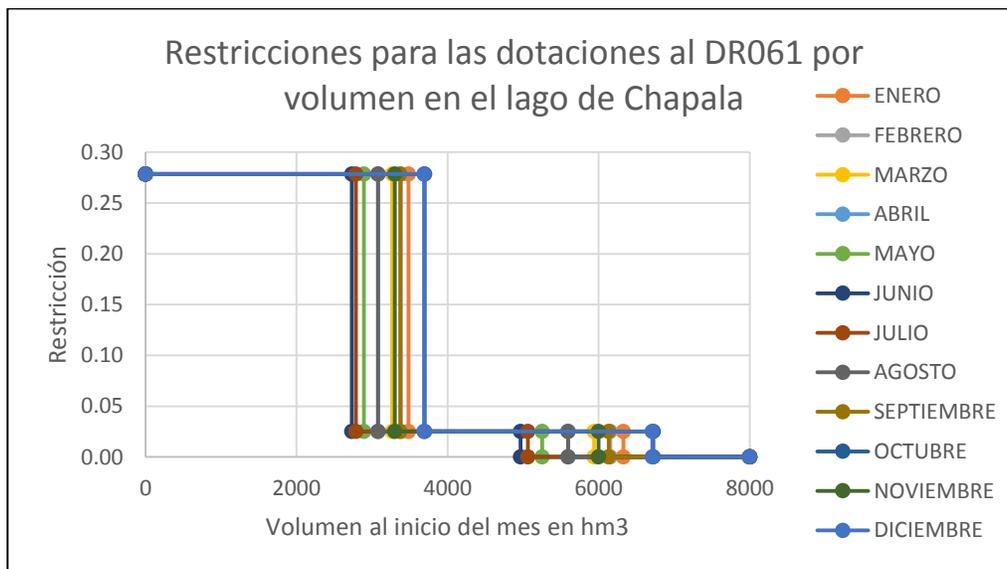


Ilustración 97.- Adaptación de la regla de operación del DR061 en función del volumen en el lago de Chapala.

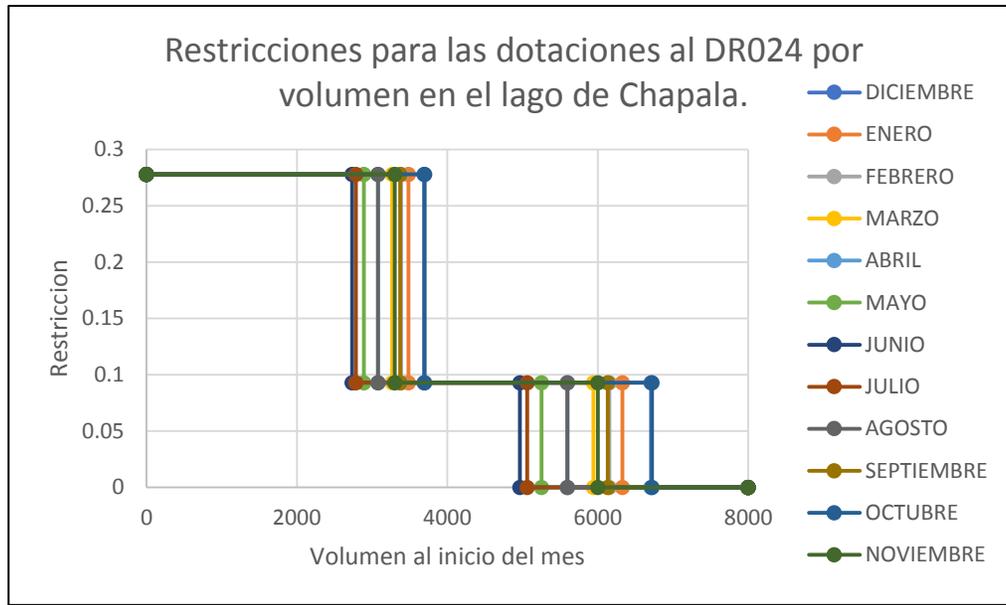


Ilustración 98.-Adaptación de la regla de operación del DR024 en función del volumen en el lago de Chapala.

Para el caso de las aportaciones en la estación Yurécuaro la regla de operación coincide para ambos distritos de riego siendo la mostrada en la Ilustración 99.

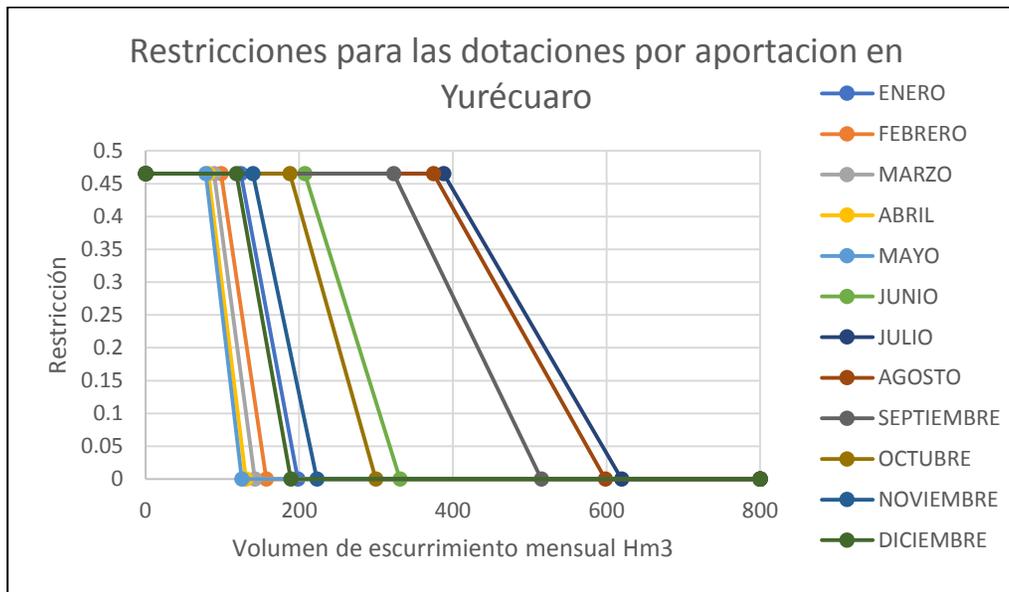


Ilustración 99.-Adaptación de la regla de operación del DR061 en función de la aportación en la estación de Yurécuaro.

Una vez establecidas las reglas de operación se cargan junto con los parámetros obtenidos de Maswin 2.0 en el modelo de sequía operativa (Simrisk), y se generan 1,000 series sintéticas correspondientes a 5 años en el periodo anterior a 1980 y 1,000 series sintéticas para el periodo posterior a 1980, primeramente sin aplicar

las reglas de operación. Los resultados indican que para el periodo posterior a 1980 no se tiene probabilidad de fallo en ninguna de las demandas, mientras que en el caso del periodo anterior a 1980 se tiene las probabilidades mostradas en la Ilustración 100.

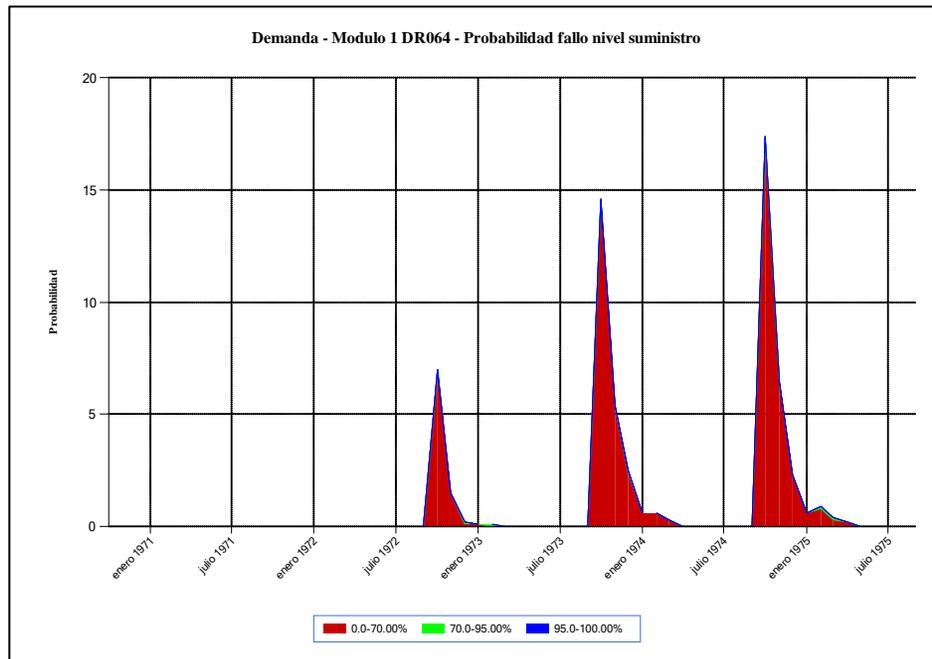


Ilustración 100.- Probabilidad de fallo existente en el módulo 1 DR061 para el periodo comprendido antes de 1980 sin aplicar ninguna regla de operación.

Una vez que se encuentra el modelo preparado, se establecen los límites permisibles de riesgo en función de los niveles de restricción de cada regla.

Para fines de analizar este nivel de riesgo tomaremos de base el segundo periodo de modelación (a partir de 1980). Para este escenario sin utilizar ninguna regla de operación las demandas presentan probabilidad de fallo del 0% por lo que los fallos generados se deberán solo a las reglas de operación.

Una vez preparado el modelo se establecen los intervalos estadísticos para los cuales nos interesa revisar la probabilidad de fallo de las reglas de operación, para esto se analizan por separado la regla que depende del lago de Chapala y la que depende de las aportaciones en Yurécuaro.

Para el caso de las reglas de operación que dependen del lago de Chapala se tienen como niveles de restricción:

DR061:

Primer nivel = 3% de restricción

Segundo nivel = 27% de restricción

DR024:

Primer nivel = 9% de restricción

Segundo nivel = 28% de restricción

Debido a que esta regla es tipo umbral se consideraron los intervalos estadísticos de menos de 70%, de 70% a 90% (actúa primer nivel de restricción), de 90% a 100% (actúa segundo nivel de restricción) y 100% de suministro, esto permite conocer qué tan probable es que se apliquen los dos niveles de restricción.

Para el caso de la regla de operación que depende de las aportaciones aguas arriba de la cuenca se tiene una curva de restricción que varía de manera lineal entre 0% de restricción a 47% de restricción, debido a esto para analizar esta regla se revisarán intervalos uniformes de 10% entre 40% y 100% del suministro para identificar para cada uno de estos intervalos la probabilidad de entregar el suministro.

Una vez que se tienen estos niveles de suministro cumplidos se realiza el análisis para las 1,000 series sintéticas obteniendo las probabilidades de fallo mostradas en las Ilustración 101 e Ilustración 102.

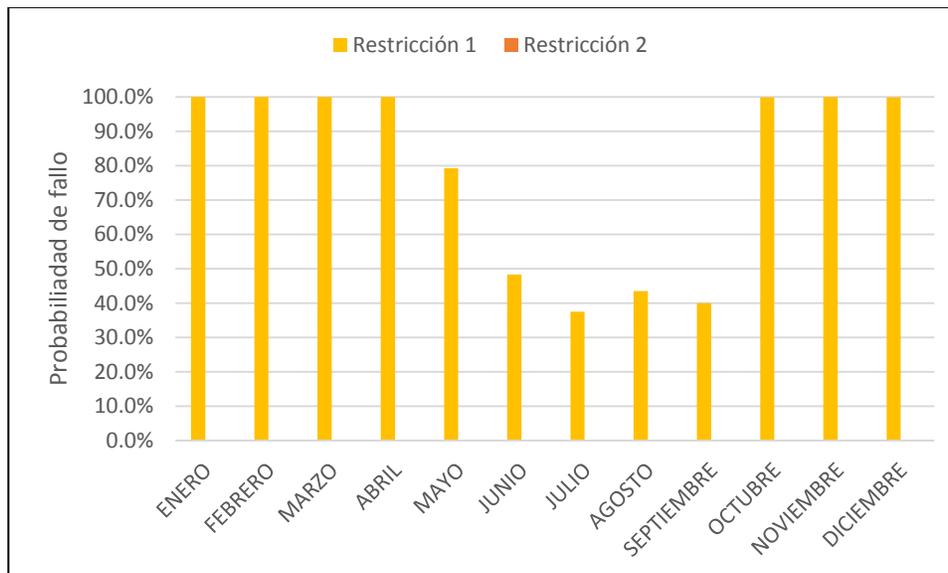


Ilustración 101.- Probabilidad de aplicación de restricción en RO en función del lago de Chapala.

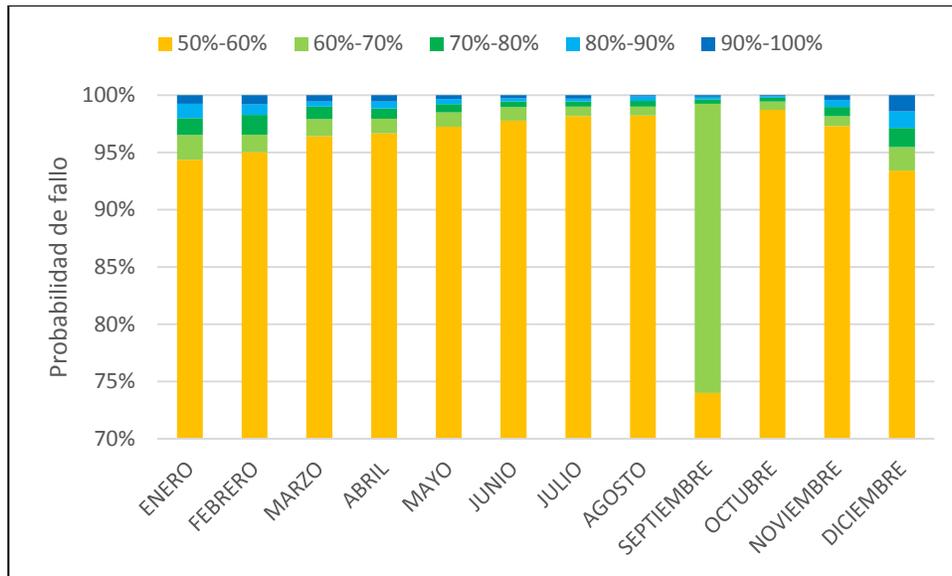


Ilustración 102.- Probabilidad de aplicación de restricción en RO en función de la aportación aguas arriba (estación hidrométrica de Yurécuaro).

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Análisis de la zona de estudio

Debido a las características topográficas y del suelo la zona de estudio es adecuada para la agricultura, esto se ve reflejado en la superficie considerada para este uso, es importante mencionar esto ya que los distritos de riego no cubren la totalidad de la zona destinada a riego, por lo que existe una parte de las demandas agrícolas que no es posible determinar su magnitud y por ende el riesgo de incumplimiento de dichas demandas.

Por otra parte, vemos que se cuenta en la cuenca con una gran cantidad de estaciones climatológicas y sobre todo hidrométricas, la presencia estas últimas se debe a que en la zona se cuenta con un problema fuerte de contaminación del recurso y para su control se han generado diversos puntos de monitoreo de la producción e agua por parte de los manantiales y su proporción con los contaminantes generado en la zona y la proximidad con el lago de Chapala lo que permite identificar que es importante para trabajos posteriores considerar adicional a la cantidad de agua la calidad en las reglas de gestión.

A pesar de la gran cantidad de estaciones hidrométricas disponibles no todas son útiles debido a que miden canales de distribución o derivaciones del río y en este caso nos interesa conocer el agua disponible por medio de los escurrimientos a régimen natural.

Finalmente el análisis de la infraestructura existente permitió identificar 3 elementos principales, el lago de Chapala y las presas Urepetiro y Barraje de Ibarra que sirven como principales elementos de gestión en la zona, debido a esto es de gran importancia conocer sus características físicas ya que nos permitirán una gestión más adecuada del recurso hídrico.

Validación, selección y análisis estadístico de la zona de estudio

Un aporte importante de este trabajo es la programación en Matlab de GESTAD, ya que este software permite realizar el análisis y validación de datos en la zona de estudio y que adicionalmente debido a su planteamiento y programación permite realizar este mismo procedimiento para datos y zonas distintas, generando una herramienta importante en el análisis estadístico de datos de precipitación.

Dicha herramienta permitió en este caso de estudio analizar las 101 estaciones climatológicas de la zona, identificando las que cuentan con datos confiables, y finalmente permitiendo señalar 35 estaciones que cuentan con las características temporales y espaciales más adecuadas, así como también permitió determinar los valores faltantes en sus registros históricos.

De la misma forma, en este apartado se identificaron las estaciones hidrométricas que cumplen con las características necesarias para ser consideradas a régimen

natural, esta característica es necesaria para la obtención de la disponibilidad superficial por medio de la modelación. De este proceso se identificaron 7 estaciones hidrométricas que cumplen con características buenas y algunas excelentes, esto permitió dar una base sólida a los modelos planteados.

Modelación del sistema superficial

La modelación superficial persigue 2 objetivos, determinar la aportación superficial y la recarga al acuífero, en el caso del escurrimiento superficial a pesar de que se cuenta con aforos en canales y ríos, estos como se pudo observar durante la validación de datos no siempre se encuentran a régimen natural, por lo que la modelación permite determinar los escurrimientos en zonas donde no se conoce el escurrimiento natural o en su defecto determinarlo en lugares donde no existen estaciones de aforo.

Se puede observar como resultado que en las estaciones 18530, 12379, 180GUA se tienen algunos índices de calibración bajos, pero de manera general la calibración cae dentro de la clasificación buena. Las estaciones 205JAR y 445URE tienen indicadores mejores teniendo una calibración general muy buena, de estas dos es en especial importante la estación 445URE, ya que nos representa las entradas a la presa Urepetiro siendo esta la más importante para el DR061 y por lo tanto una de las demandas más importantes en el sistema. Finalmente, la estación 12589 cuenta con los mejores índices de calibración teniendo una calibración general de excelente.

Una vez que se tienen las cuencas calibradas uno de los principales problemas es decidir los criterios para trasladar estos parámetros al resto de las cuencas que no cuentan con datos medidos para realizar la calibración, es por esto que se propone la aplicación de métodos multivariados, específicamente el método de Ward para la generación de grupos multivariados considerando las características del suelo, geología y, uso de suelo y vegetación para buscar las cuencas más parecidas entre sí.

Podemos observar de esta metodología lo siguiente:

- El caso del grupo 1 es bastante compacto como se puede observar en el dendograma, esto es un indicador de cuencas parecidas entre sí, lo que hace que nuestro traslado de parámetros sea lo mejor posible.
- Los grupos 3 y 4 nos muestran grupos no tan compactos como el grupo 1 pero claros por lo que serían los siguientes grupos en nivel de confianza.
- El grupo 2 es el más disperso de los grupos generados, por lo que nos representa el grupo con mayor incertidumbre, empero cuenta con características suficientemente parecidas para considerarse un mismo grupo.
- Por último, tenemos las cuencas 18lg3, 12Cd3 y 12Cd4, las cuales debido a sus características no son clasificadas en alguno de los grupos generados,

por lo que se optó por asignar los parámetros del grupo más cercano respecto al dendograma buscando la menor incertidumbre.

Aquí es importante mencionar que en este caso la cuenca del río Duero en la cual afectarán los escurrimientos se encuentra principalmente en el grupo 1 y posteriormente en el grupo 3 y 4, por lo que la incertidumbre con respecto a las aportaciones superficiales es la mínima.

Esto finalmente nos permite determinar la infiltración en toda la zona necesaria para el modelo subterráneo y, las aportaciones de las cuencas correspondientes al río Duero para el modelo de gestión y las series históricas de partida para las series sintéticas, recordando que la mayor confianza se encuentra en las cuencas destinadas a estas 2 últimas.

Modelación del sistema subterráneo

Los resultados obtenidos de esta modelación no fueron favorables ya que no se logró representar de forma adecuada en lo que a niveles piezométricos se refiere, aunque se representa de forma favorable las direcciones de flujo, debido a esto se ve la necesidad de cambiar el modelo con el que se representa este elemento por un modelo más sencillo.

Como parte del resultado podemos intuir que hace falta considerar algunos elementos para que el modelo arroje resultados adecuados o algunas características de la zona no se están considerando de forma adecuada, por lo que un modelo de autovalores de la zona requiere un trabajo más detallado.

Modelo de Gestión Hídrica.

El modelo de gestión integra las aportaciones superficiales y subterráneas, así como las demandas agrícolas y urbanas, esto permite al contar con los elementos de control (presas) y las demandas, calibrar una de las fuentes de abastecimiento, en este caso el acuífero unicelular, el resultado de esta calibración es satisfactorio ya que se representa de manera adecuada el almacenamiento en el lago de Chapala, presa Urepetiro y presa Barraje de Ibarra, lo que representa 3 puntos de calibración.

El modelo de gestión no incorpora las reglas de operación ya que el periodo de calibración comprende un periodo previo a la implementación de las mismas, esto permite calibrar de mejor manera el modelo ya que al no existir limitantes en las demandas estas son satisfechas y se observa la afectación que estas fueron generando a su vez en el lago de Chapala, por lo que para este modelo no existes fallas en las demandas ya que el agua que se requería por las zonas agrícolas era entregada y no llegaba al lago de Chapala.

En las gráficas comparativas de la calibración del lago de Chapala podemos observar periodos en los que se alejan los datos medidos de los resultados de la modelación, un análisis lógico de estos periodos permite observar que existen periodos en los que sin explicación aparente aparecen incrementos en el volumen

de agua en el lago, en meses que no deberían existir dichos incrementos, adicionalmente se observa que dichos incrementos son proporcionales y de la misma manera como suceden desaparecen, por lo que se puede concluir que esto se trata de un error en los equipos de medición o un error humano.

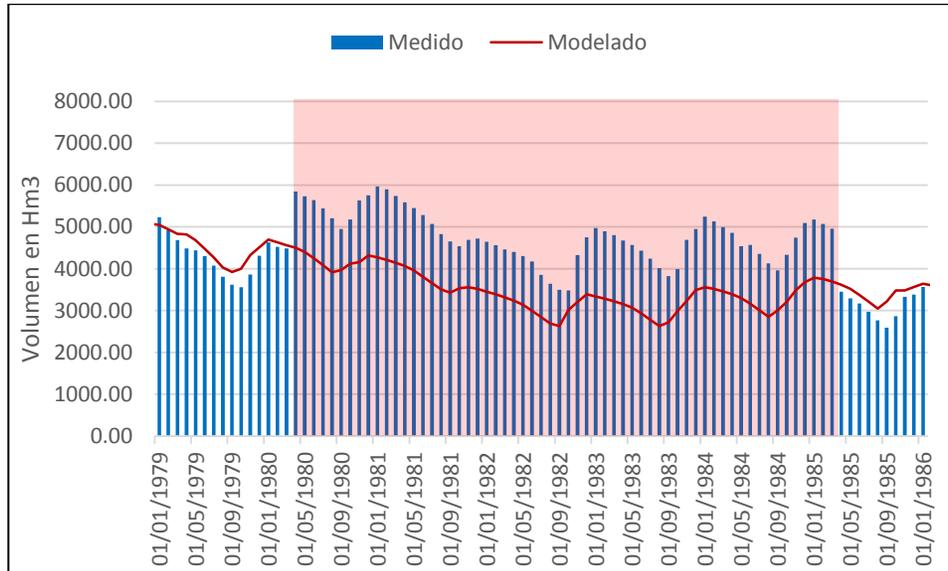


Ilustración 103.- Posible error en los datos medidos comprendido entre 01/04/1980 y 01/03/1985.

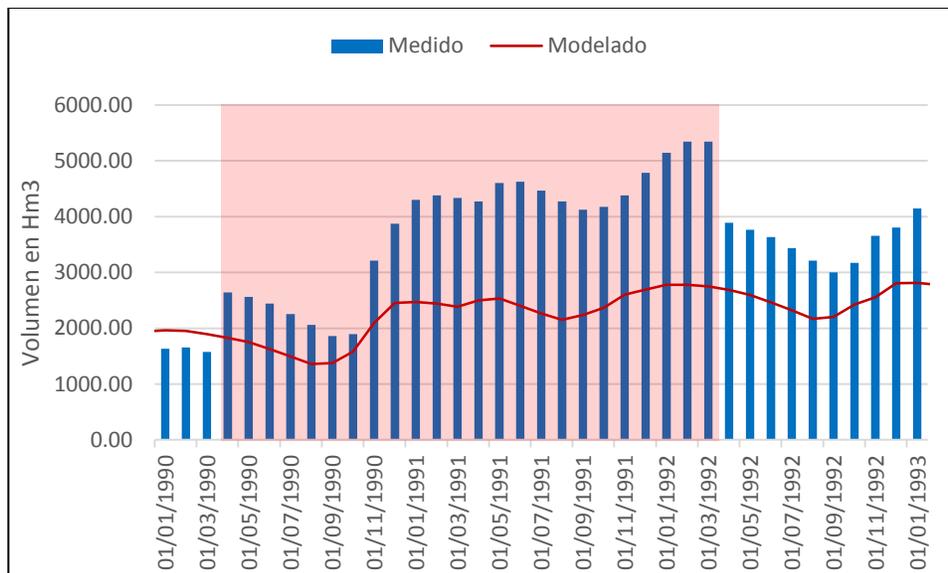


Ilustración 104.- Posible error en los datos medidos comprendido entre 01/04/1990 a 01/03/1992.

Generación de series sintéticas de caudales

La parte más importante en la generación de las series sintéticas es la identificación del modelo a emplear, debido a que este tipo de modelos puede tener tantos parámetros como se desee, pero no siempre el tener más parámetros genera mejores resultados, en este caso podemos observar en las Ilustración 93 e Ilustración 94 que la diferencia en el error que presentan los modelos ARMA(1,1)

los cuales tienen mayor número de parámetros, generan un mayor error en los modelos generados para este caso de estudio.

Los modelos AR(1) y AR(2) no presentan diferencia considerable entre los errores que generan, por lo que cualquiera de estos modelos podría emplearse en este caso, por lo que siguiendo el principio de parsimonia se puede elegir el modelo más sencillo reduciendo el costo y tiempo computacional requerido sin afectar significativamente los resultados.

Finalmente entre utilizar series de furrier o no al momento de determinar los armónicos para la generación de las series, observamos un fenómeno similar que al comparar los modelos AR, la diferencia entre los errores no son representativos por lo que la selección del modelo cae en el modelo más sencillo.

Modelo de gestión de sequía operativa.

Al concluir la construcción del modelo de gestión de sequía operativa se realizó una primer prueba de modelación sin considerar reglas de operación, como resultados de esta prueba se puede observar que en el modelo se genera riesgo de incumplimiento de las demandas a pesar de no tener restricción y que este incrementa gradualmente año con año, esto puede deberse a que existe en los datos de aportación de Yurécuaro un periodo de transición entre los 2 periodos establecidos como se puede mostrar en la Ilustración 105; debido a este periodo se tiene un cambio gradual que puede afectar a la generación de las series sintéticas y por lo tanto afectar los resultados para este primer periodo por lo que genera fallos en el sistema. Debido a esta situación el primer periodo es descartado para fines de evaluación de las reglas de operación.

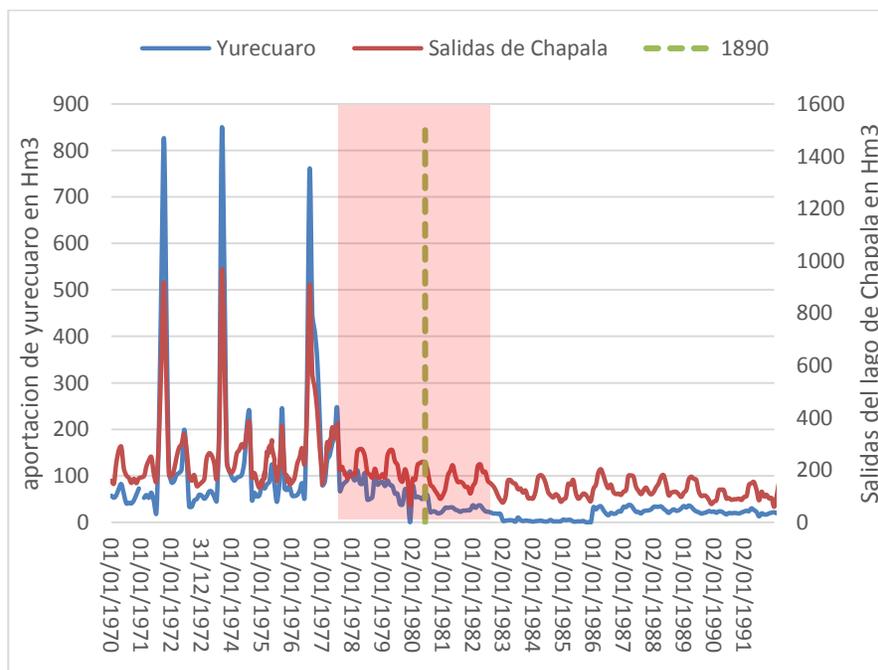


Ilustración 105.- Periodo de adaptación al cambio en la operación del sistema.

Al revisar los resultados de la evaluación de las reglas de operación, podemos observar que en el caso de la regla de operación que depende del lago de Chapala, la probabilidad de que se active el primer nivel de restricción es muy alto como se observa en la Ilustración 101, siendo del 100% en los meses de enero, febrero, marzo, abril, octubre, noviembre y diciembre, el resto de los meses tiene una probabilidad de activarse este nivel de restricción elevado en mayo (79%) y más bajo en los meses de junio, julio, agosto y septiembre (48%, 38%, 44% y 40% respectivamente) lo que representa un riesgo en la aplicación de una primera restricción muy alto. La probabilidad de que se presente el segundo nivel de restricción es nula, lo que indica la necesidad de reajustar esta regla de operación.

Por otro lado, la regla de operación correspondiente a la aportación existente en la estación de Yurécuaro, cuenta con una probabilidad alta de aplicar la máxima restricción en todos los meses (superior al 90%) a excepción de septiembre donde es de 74%, esto indica que la regla de operación casi todo el tiempo está limitando el agua que se entrega al 47% del agua que se requiere, lo que genera una sequía operativa.

CONCLUSIONES

La modelación es una excelente herramienta para dar soporte a las decisiones que se pretenden tomar especialmente en sistemas complejos donde las pruebas prácticas resultan complicadas debido al tiempo que requieren y las problemáticas que pueden generar en el sistema.

Un buen modelo parte de una buena base, la cual son los datos, estos siempre deben ser recolectados teniendo en mente que deben cumplir con las características necesarias, es decir ser adecuados, significativos y precisos, esto permitirá poder tener confianza en los datos y por ende en los análisis que se realicen con ellos. La existencia de herramientas para el análisis de datos es importante por lo que el aporte de este trabajo de investigación en este campo, el software GESTAD tiene por objetivo agilizar trabajos posteriores sin perder confiabilidad en los datos de entrada de las modelaciones, permitiendo tener la mayor certidumbre de la modelación desde un inicio.

Cuando se habla de la gestión del recurso agua es importante no perder de vista las fuentes de abastecimiento que se tienen, así como la importancia que tienen, debido a las diferentes situaciones que se analizan no siempre se contará con los datos que se requieren para realizar un análisis como se desea, pero la modelación puede subsanar esta información.

Para el caso en estudio la primera modelación que se lleva a cabo es un modelo lluvia-escorrentamiento que nos aporta los escurrimientos y las infiltraciones, estos parámetros de calibración fueron buenos, lo que nos permite representar de la forma más adecuada el comportamiento del sistema en este aspecto.

La modelación subterránea por el método de autovalores, la cual se pensaba como una buena alternativa para la incorporación de la parte subterránea, en un principio se consideró buena opción ya que realizaba un cálculo más preciso del comportamiento, y en un sistema como es el Lerma-Chapala que cuenta con un aporte subterráneo importante parecía la mejor opción, sin embargo en la ejecución la modelación no dio los resultados esperados, lo que llevo a la necesidad de implementar un modelo unicelular que es mucho más sencillo pero logró representar de manera satisfactoria la parte subterránea del sistema de la cuenca del río Duero.

A partir de estos dos modelos que representan la oferta del sistema e incorporando las demandas agrícolas y urbanas, fue posible generar un modelo que representa bien el comportamiento del sistema en cada uno de sus elementos, de acuerdo con la comparación con los datos observados.

Finalmente con el modelo de gestión e incorporando las series sintéticas que representan escenarios con la misma probabilidad de ocurrir que la serie histórica, fue posible evaluar si las reglas de operación implementadas hasta la fecha son

adecuadas, obteniendo como resultado que dichas reglas no son la mejor opción ya que cuentan con gran probabilidad de generar una sequía operativa, es decir, aunque el agua es suficiente para cubrir las necesidades, el sistema se encuentra cubriendo la mayor parte del tiempo aproximadamente la mitad de las demandas, esto puede deberse a que cuando se comenzó a plantear dichas reglas debido a los niveles alarmantes que estaba alcanzando el lago de Chapala (1980) las condiciones de operación eran muy distintas como hemos podido observar, por lo que una actualización de estas reglas es necesaria y como se demostró por medio de este trabajo de investigación, fue posible generar un sistema soporte a la decisión capaz de representar adecuadamente el sistema de recursos hídricos del río Duero. Esta herramienta permite analizar y proponer nuevas reglas de operación conociendo el riesgo que podrían generar en el cumplimiento de las demandas.

LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Como continuación de este trabajo de investigación, como muchos otros una vez concluidos generan más preguntas e hipótesis, por lo que se proponen los siguientes temas para dar continuidad a este trabajo:

Modelación del acuífero del río Duero, Michoacán por medio del método de autovalores y su implementación en un modelo de gestión.

Generación de modelos para series sintéticas cuando existen variaciones en la operación del sistema.

Implementación de modelos de gestión del riesgo con calidad del agua en la cuenca del río Duero, Michoacán.

Modelación del sistema de recursos hídricos de la cuenca Lerma-Chapala.

Evaluación y propuestas de reglas de operación para la cuenca Lerma-Chapala.

REFERENCIAS

- Alvarez, Andreu, y D. Salas. 1989. "La Modelacion En Planificacion Hidraulica".
- Andreu, Joaquin, Abel Solera, Capilla R. J, y J. Ferrer Polo. 2017. "Modelo SIMGES de simulación y Gestión de los Recursos Hídricos, incluyendo utilización conjunta". *Universidad Politécnica de Valencia*: 102.
<https://aquatool.webs.upv.es/files/manuales/aquatool/ManualSimGesEsp.pdf> (el 10 de julio de 2018).
- Andreu, Joaquín, Alvarez Solera, Solera Capilla, y Sonia T. Sánchez. 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".
<https://aquatool.webs.upv.es/files/manuales/aquatool/ManSimriskEsp.pdf> (el 10 de julio de 2018).
- Aparicio, Francisco. 1992. Fundamentos de hidrología de superficie *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. LIMUSA GRUPO.
- Avilés, Alex, y Abel Solera. 2015. "Estimación del riesgo de fallo en el suministro de agua como ayuda a la planificación y gestión de recursos hídricos". *Maskana* 3(2): 77–86.
- Aviles, Alex, Abel Solera, y Javier Paredes. 2016. "Análisis Del Rendimiento De Sistemas Hídricos En Desarrollo Mediante El Acople De Modelos Estocásticos Hidrológicos Y Optimización De Redes De Flujo". *Ingenius* (15): 48.
<http://revistas.ups.edu.ec/index.php/ingenius/article/view/15.2016.05>.
- Caire M., Georgina. 2005. 17 Región y sociedad *Región y sociedad : revista de el Colegio de Sonora*. El Colegio de México.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-39252005000300003 (el 27 de junio de 2018).
- Campos A, Daniel. 2011. *Estimación y aprovechamiento del escurrimiento*. Primera. San Luis Potosí.
- Campos, Daniel. 1992. *Procesos Del Ciclo Hidrológico-Campos Aranda*. Pdf. segunda. San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- . 2015. "Búsqueda de tendencias en la precipitación anual del estado de Zacatecas, México; en 30 registros con más de 50 años". *Ingeniería, Investigación y Tecnología* 16(3): 355–68.
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1405774315000268>.
- Cantor, Diana, y Andrés Ochoa. 2011. *Evaluación Y Análisis Espaciotemporal De Tendencias De Largo Plazo En La Hidroclimatología Colombiana Diana*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

- Cicese. 2018. "Base De Datos Climatológica Nacional (Sistema Clicom)". CLICOM. [Http://Clicom-Mex.Cicese.Mx/](http://Clicom-Mex.Cicese.Mx/).
- CONAGUA. 2009. *Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Michoacán*. 1a ed. ed. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F.
- . 2018. "Banco Nacional De Datos De Aguas Superficiales (BANDAS)". <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/PortadaBANDAS.htm>.
- Correa, Juan Carlos, René Iral, y Lucinia Rojas. 2006. "Estudio de potencia de pruebas de homogeneidad de varianza". *Junio* 29(1): 57–76. https://www.emis.de/journals/RCE/V29/V29_1_57Correalral.pdf (el 23 de enero de 2019).
- Díaz, Gabriel et al. 2008. 34 Agricultura Técnica en México *Space Interpolation Of The Pluvial Precipitation In The Windward Area And Leeward Of The Gulf Of Mexico*.
- Escalante, Carlos, y Lilia Reyes. 2002. *Técnicas Estadísticas en Hidrología*. Mexico D.F.
- Estrela, Teodoro. 2014. "La gestión de las sequías en España". (January 2006).
- Haro, D., Abel Solera S., Pedro M. Monzonís, y J. Andreu. 2014. "Optimal Management of the Jucar River and Turia River Basins under Uncertain Drought Conditions". *Procedia Engineering* 89: 1260–67. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814025478> (el 22 de junio de 2018).
- Haro, David, Abel Solera, y Joaquín Andreu. 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.022>.
- Ortega G., David, y Israel Velasco. 2013. "Aspectos socioeconómicos y ambientales de las sequías en México". *Aqua-LAC* 5(2): 78–90.
- Paredes, Javier, Abel Solera, Joaquin Andreu, y Néstor Lerma. 2017a. *Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos*. Manual técnico v1.1. 1.1. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- . 2017b. *Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos*. Manual Técnico v1.1. Universidad Politécnica de Valencia. https://aquatool.webs.upv.es/files/manuales/aquatool/Manual_Tecnico_EvalHid.pdf (el 24 de enero de 2019).
- Sahuquillo, Andres. 1983. "An Eigenvalue Numerical Technique for Solving Unsteady Linear Groundwater Models Continuously in Time". *Water Resources Research* 19(1): 87–93.

- Sanchez, Sonia T. 1999. "Modelo SIMRISK de Simulación múltiple de la gestión de los Recursos Hídricos con estimación del riesgo, incluyendo utilización conjunta." Universidad Politécnica de Valencia.
- Silva, José et al. 2013. "Calidad química del agua subterránea y superficial en la cuenca del Río Duero, Michoacán". *Tecnología y Ciencias del Agua* 4(5): 127–46. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v4n5/v4n5a9.pdf>.
- Suárez A., Sara et al. 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: 126–39. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.259>.
- Valiente, Óscar M. 2001. "Sequía : Definiciones , Tipologías Y Métodos De Cuantificación". *Investigaciones Geográficas* 26: 59–80.