



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



MODELACIÓN DEL ACUÍFERO APATZINGÁN

Tesis
para obtener el grado de
INGENIERO CIVIL

Presenta
MARÍA DEL MAR NAVARRO FARFÁN

Asesor
SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE
Doctora en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

Co-asesor
MARIO ALBERTO HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ
Doctora en Ingeniería del Agua y Medioambiental.

Morelia, Michoacán.

Mayo, 2017.

“Cuando yo me haya ido, cierra los ojos y piensa en mí, esté donde esté... aquí estaré”

A mi mamá: Rocío, la mujer más maravillosa que he tenido la fortuna de conocer, quien me enseñó que la fuerza y la valentía vienen del interior, aquella que me mostró que pedir una tregua es ganar y saber dejar ir es amar.

A mi tía: Violeta, mi segunda madre, quien me mostró que la mejor manera de amar es dando todo de corazón y que los problemas se afrontan con la frente en alto, quien me demostró que nunca te pueden hacer sentir inferior.

A mi Nonno: Isidro, que siendo la persona más fuerte y comprometida se convirtió en mi héroe, que fue un padre para mí y siempre logró arreglar mi mundo con una sonrisa, aquel con quien aprendí la complicidad.

Gracias a ustedes estoy en este punto de mi vida. Ustedes fortalecieron mis alas para poder volar alto, así que, tengan la seguridad de que nos volveremos a encontrar; mientras tanto, su legado será mi mayor fortaleza.

AGRADECIMIENTOS

A Beбето: hemos llegado lejos y seguiremos adelante juntos; a Aarón por comprenderme y apoyarme en todo momento; a mi Nonna, que siempre ha estado conmigo; a Roberto, a quien considero como un segundo padre; a mis primas, que son parte de mi alma: Valeria y Natalia; a mi madrina Paty, quien me ha apoyado incondicionalmente: académica y emocionalmente; a la familia Gutiérrez Barajas, por el cariño brindado y el apoyo incondicional; y a mi tío Zarco. A ustedes los quiero con todo mi corazón.

A mi asesora la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe, por involucrarme en este ámbito, por tener la confianza y la certeza de que iba a poder realizar este trabajo, por sus regaños y sus exigencias que me hicieron crecer.

A mi asesor el Dr. Mario Alberto Hernández Hernández; por su paciencia y su apoyo en todo momento, por ayudarme a superarme académicamente y prepararme para el futuro; por acompañarme a lo largo de este proyecto y por darme el honor de trabajar con usted.

A mis amigos, con quienes recorrí alguna etapa de vida, quienes me ayudaron en los momentos de desesperación y crisis y acompañaron a lo largo de este proyecto, con quienes he vuelto a aprender a disfrutar la vida: Erika, Azu, Katy, Ivon, Liliana, Orlado, Daniel, Migue, Dorlix, Luisda, Ariel, Osmar, Oseguera, Jaime, Jafet, Iván, Rojo y todos aquellos con quienes haya compartido tiempo, trabajo y esfuerzo.

A los maestros que me enseñaron a lo largo de toda esta travesía.

Y a todos aquellos que han llegado a formar parte de mi vida...

Gracias totales.

CONTENIDO

Resumen	I
Abstract.....	II
Introducción.....	III
Objetivos.....	V
Objetivo Principal.....	V
Objetivos Particulares	V
1 Antecedentes	1
1.1 Generalidades del Acuífero Apatzingán	1
1.2 Ubicación Geográfica	2
1.3 Gestión del Recurso Hídrico Actual	3
1.3.1 Decretos de Veda.....	3
1.3.2 Distrito de Riego	3
1.4 Fisiografía y Geomorfología.....	3
1.5 Clima	4
1.6 Hidrografía	4
1.7 Geología	5
1.7.1 Tipo de acuífero.....	5
1.7.2 Parámetros hidráulicos.....	6
1.7.3 Piezometría.....	6
1.7.4 Aprovechamientos subterráneos	7
2 Materiales	8
2.1 Bases de datos	8

2.2	Información Digital de INEGI	8
2.2.1	Generador de Información GEográfica.....	8
2.3	CLICOM	10
2.4	REPDA.....	11
2.5	BANDAS.....	12
2.6	Sistema de Información Geográfica.....	13
2.6.1	ArcGIS	14
2.7	Modelos matemáticos	15
2.7.1	Modelo de Simulación Superficial: EvalHid	16
2.7.2	Modelo de Simulación Subterránea: Aquival	18
3	Metodología.....	20
3.1	Generación de cuencas.....	20
3.2	Gestión de datos.....	20
3.2.1	Obtención de estaciones y datos.....	20
3.2.2	Selección de estaciones.....	21
3.2.3	Pruebas en las estaciones.....	21
3.2.4	Matriz de correlación.....	24
3.2.5	Periodo de años de estudio	24
3.2.6	Llenado de estaciones de precipitación	25
3.2.7	Series de temperatura	28
3.2.8	Series de evapotranspiración	28
3.3	EvalHid	31
3.4	Témez.....	33
3.4.1	Proceso de cálculo	37

3.4.2	Parámetros	42
3.5	Interfaz del software	43
3.6	Análisis y sensibilidad del modelo	50
3.6.1	Calibración manual	51
3.6.2	Calibración automática	51
3.6.3	Herramienta de calibración	51
3.6.4	Indicadores de ajuste	54
4	Simulación subterránea	58
4.1	AQUATOOL	58
4.2	Aquival	59
4.2.1	Plataforma del software	61
4.2.2	Interfaz del software	63
5	Resultados	65
5.1	Generalidades	65
5.2	Gestión de datos	74
5.3	Simulación EvalHid	76
5.3.1	Resultados anuales	76
5.3.2	Resultados año medio	79
5.3.3	Resultados mensuales	81
5.3.4	Balance Hídrico	84
5.4	Simulación Aquival	86
6	Conclusiones	94
	Gestión de Datos	94
	Simulación Superficial	94

Simulación Subterránea	95
Conclusiones Generales	96
7 Recomendaciones	97
Referencias	98
Índice de Figuras	102
Índice de Tablas	105
Índice de Gráficas.....	107

RESUMEN

La evaluación del recurso hídrico es un aspecto fundamental para la planificación y gestión del agua. En México la mayor fuente de agua potable proviene del subsuelo, donde ésta se encuentra menos contaminada, pero a su vez, esa fuente es dependiente de las lluvias estacionales y la recarga.

Para el caso de estudio (acuífero Apatzingán), se propone el uso de una herramienta de simulación precipitación-escorrentía (Evalhid), la cual integra el modelo hidrológico Témez, con el que es posible calcular la disponibilidad hídrica media anual. El objeto del uso de esta herramienta es lograr calibrar un modelo de cuenca que simule las aportaciones e infiltraciones a partir de registros históricos de precipitación y temperatura, para contar con un modelo superficial suficientemente robusto, que permita realizar estudios de mayor complejidad en el acuífero estudiado.

Los distintos escenarios de gestión a modelar y sus componentes condicionarán el tipo de modelo subterráneo a utilizar (en el caso del acuífero Apatzingán, de tipo semi-distribuido), debiendo ajustar sus parámetros en función de datos observados (niveles piezométricos, cambio en el volumen de almacenamiento o descargas por conexión a manantial o río). Para el caso de estudio, éste se caracterizó y discretizó por medio de una retícula uniforme (celdas), de tal forma que se pudieran asignar acciones elementales en cada una de ellas, tales como extracciones (urbanas, agrícolas e industriales) y recargas por lluvia, así como valores para los parámetros hidrogeológicos de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento. Esta información fue utilizada en el software Aquival para reproducir el comportamiento del acuífero estudiado.

Palabras clave: acuífero, recurso hídrico, calibración, modelación superficial, modelación subterránea.

ABSTRACT

The assessment of water resources is a fundamental aspect for the planning and management of water. In Mexico, the major source of drinking water comes from under soil, where it's less contaminated, but at the same time, that source depends on seasonal rains and the recharging in the zone.

For the case study (Apatzingán aquifer), it is proposed the use of a precipitation-runoff simulation tool (Evalhid), that integrates the hydrological model Temez, which makes it possible to calculate the average annual availability. The purpose of this tool is a caliber of basin model that simulates the contributions and infiltrations from historical records of precipitation and temperature, to have a surface model of robust, that allow to perform the underground simulation of the aquifer studied.

The different management scenarios to be modeled and their components will condition the type of underground model to be used (in the case of the Apatzingán aquifer, of semi-distributed type), having to adjust its parameters according to observed data (piezometric levels, change in volume Storage or discharges by connection to a spring or river). For the zone in study, the underground model uses the method of Autovalues, it was characterized and discretized by a uniform reticle (cells), in such a way that the elementary actions could be assigned in each of the cells, such as extractions (urban, agricultural and industrial) and rain recharges, as well as values of hydrogeological parameters of hydraulic conductivity and coefficient of storage. This information was used in the software Aqual to reproduce the behavior of the aquifer.

Keywords: aquifer, water resources, calibration, superficial modelling, underground modelling.

INTRODUCCIÓN

En México, 90 millones de habitantes se abastecen de agua proveniente de los mantos acuíferos (INEGI, 2017), ante ello, existe la necesidad de conocer la disponibilidad hídrica tanto superficial como subterránea en distintas zonas de estudios a lo largo de todo el país.

Dada la importancia del agua subterránea, a partir de la década de los setenta se han aumentado de manera significativa el número de acuíferos sobreexplotados (CONAGUA, 2016), por lo que al 31 de diciembre de 2015 los registros de la CONAGUA mostraban 105 acuíferos en estas condiciones y de los cuales se extrae aproximadamente el 49% del agua subterránea para todos los usos.

En particular, el acuífero Apatzingán tiene influencia sobre 8 municipios del estado de Michoacán para el abastecimiento del agua (aproximadamente 14% del agua extraída del subsuelo en el estado). Cruzando de Este a Oeste al acuífero, se encuentra el distrito de riego 097 Lázaro Cárdenas, el cual es un productor importante de maíz y cítricos en el estado.

Aproximadamente el 95% del agua concesionada por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA, 2017) es destinada al uso agrícola, por lo que para el acuífero mencionado, resulta de suma importancia el abastecimiento de agua en esa zona en específico. La sobreexplotación del acuífero conduce a comprometer los recursos futuros del acuífero, de tal forma que no podrían seguir explotándose a las tasas actuales (de aproximadamente 270hm^3). Además, altas tasas de extracción subterránea podrían originar fuentes de contaminación puntual del recurso hídrico existente (superficial y subterráneo), ya sea por lixiviación, retornos de riego con fertilizantes y el nitrato proveniente de los plaguicidas, extracción de aguas pesadas o con alto contenido de elementos contaminantes de origen natural, etc.

Por otro lado, la mayoría de los estudios que se realizan en México, referentes a la disponibilidad hídrica en una zona, son realizados bajo la norma NOM-011-CONAGUA-2015, como son los Informes de Disponibilidad Hídrica de Conagua (CONAGUA, 2009).

El uso de software específico para la modelación hidrológica, permite un manejo más simplificado de los datos a utilizar, donde los procesos se vuelven automatizados y lo que los vuelve más rápidos en la generación y evaluación de resultados.

Algunos de los datos que se requieren para alimentar a los modelos hidrológicos no se conocen, lo que se torna en una problemática, derivando en un proceso más o menos complejo (en función del tipo de dato, disponibilidad y acceso), que permitan la obtención de dichos valores. Ante tal situación, existe la necesidad de seleccionar un modelo hidrológico adecuado, según sean las necesidades y recursos con que se cuente específicamente en cada zona en estudio.

En este trabajo se propone el uso de herramientas informáticas como apoyo para la modelación hidrológica (superficial y subterránea) de un sistema de recursos hídricos. Para realizar la simulación superficial, se utilizará el software EvalHid, con el cual podremos obtener el balance hídrico de la zona en estudio, dentro del cual encontramos los escurrimientos y las recargas para las cuencas de simulación.; también utilizamos el software Aquival, el cual es un módulo para el preproceso y simulación de acuíferos; para el funcionamiento del programa se agregan además las acciones elementales, donde se incluyen las extracciones obtenidas en la base de datos del REPDA y las recargas obtenidas con el programa EVALHID.

AQUIVAL es un entorno de desarrollo de sistemas de decisión para planificación y gestión de cuencas en la cual podemos obtener la disponibilidad hídrica de un acuífero de manera puntual que, en este caso resultaría de suma importancia investigar con mayor detalle el comportamiento del acuífero, en especial en la zona del distrito de riego.

OBJETIVOS

OBJETIVO PRINCIPAL

Calibrar modelos hidrológicos de simulación superficial y subterránea para la zona de estudio, con los que sea posible obtener resultados factibles para cualquier periodo de simulación, que puedan ser utilizados posteriormente en estudios futuros, ya sean de tipo hidrológicos o de gestión de recursos hídricos.

OBJETIVOS PARTICULARES

- a. Estandarizar un proceso de gestión de datos, adecuando la metodología para la zona en estudio, de tal forma que la selección de estaciones principales y su llenado no altere en gran medida a las series de datos originales, así como generar series sintéticas para la modelación superficial a partir de esta estandarización.
- b. Generar mediante el uso de SIG's, las cuencas necesarias en la zona de estudio, para su simulación hidrológica superficial.
- c. Calibrar los distintos modelos de lluvia-escorrentía (uno para cada cuenca generada), para lograr simular las condiciones hidrológicas específicas de cada cuenca en el área de trabajo.
- d. Caracterizar el acuífero Apatzingán para su evaluación por el método de Autovalores.
- e. Determinar en base a la modelación superficial, las entradas existentes al acuífero (en régimen natural), para conocer la recarga natural que se presenta en la zona de estudio.

1 ANTECEDENTES

Los acuíferos consisten en sistemas de rocas o formaciones geológicas, homogéneas o heterogéneas, con espacios vacíos (poros, grietas o fracturas), llenos de agua. En general, lo que identifica una unidad acuífera, o un sistema acuífero en el sentido de hacerlo diferente de otro es que dentro de cada uno de ellos existe continuidad física del agua contenida en la zona de saturación; es decir, saltando de una molécula de agua a otra molécula contigua puede recorrerse todo el sistema, por lo que se puede entender que dos sistemas acuíferos son individualmente diferentes cuando esto no ocurre, cuando para pasar del agua de uno al agua de otro necesariamente se tenga que atravesar una zona seca (Navarro, 2017).

De acuerdo a Navarro (2017), el agua subterránea no es una ocurrencia rara, al contrario, es sumamente común e importante, además de que los acuíferos tienen una extensión y una distribución espacial muy variable.

Según Arreguín (2011), el agua subterránea es vital para México, ya que son las principales fuentes permanentes de agua en regiones áridas y semiáridas, la cuales ocupan alrededor del 50% del territorio nacional. Por otra parte, este recurso sustenta el riego de unos dos millones de hectáreas (poco más de la tercera parte de la superficie total irrigada en el país), además de suministrar cerca del 75% del volumen de agua utilizado en las ciudades (donde se concentran alrededor de 65 millones de habitantes) y satisfacer las demandas de agua de la gran mayoría de los desarrollos industriales, así como abastecer a casi toda la población rural (25 millones de habitantes).

1.1 GENERALIDADES DEL ACUÍFERO APATZINGÁN

La zona de estudio es el acuífero Apatzingán, el cual está localizado en el estado de Michoacán, siendo uno de los 653 acuíferos en los que está dividido el territorio mexicano. Cuenta con una extensión territorial de 5656km² y de acuerdo a CONAGUA (2009), tiene riesgo de sobreexplotación, debido al volumen de agua extraído para satisfacer las necesidades de riego, abastecimiento urbano e industrial de esta región del estado.

1.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La zona en estudio se localiza entre la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, en la parte suroeste del estado de Michoacán, entre las coordenadas -102.1° a -103.263° de longitud y 18.69° a 19.453° de latitud.

El área de éste acuífero está conformada por territorio perteneciente a los municipios de Aguililla, Apatzingán, Buenavista, Coalcomán, Parácuaro, Periban, Tancítaro y Tepalcatepec (CONAGUA, 2009). Cada municipio tiene una participación dentro del acuífero, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Influencia del acuífero en los municipios (CONAGUA, 2009).

Municipio	% de participación
Aguililla	60
Apatzingán	80
Buenavista	100
Coalcomán	5
Parácuaro	15
Periban	5
Tancítaro	60
Tepalcatepec	100

La tabla 2 muestra los principales centros de población localizados en la zona y la población en cada uno de ellos:

Tabla 2. Habitantes en la zona de estudio (CONAGUA, 2009).

Municipio	Población (habitantes)
Apatzingán	89834
Parácuaro	3582
Peribán	10935
Tancítaro	4439
Tepalcatepec	14962

1.3 GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO ACTUAL

1.3.1 DECRETOS DE VEDA

Para la explotación racional y sustentable del acuífero, así como para el correcto aprovechamiento del recurso hídrico proveniente del subsuelo, se establecieron decretos de veda y control en los años 1975 y 1987, las cuales indican que de acuerdo a sus características, las extracciones deben ser limitadas para uso doméstico, industrial y riego, entre otros.

1.3.2 DISTRITO DE RIEGO

Dentro del acuífero Apatzingán, se ubica el distrito de riego 097 “Lázaro Cárdenas”, el cual se localiza en el occidente del Estado de Michoacán, la zona que abarca es conocida como “tierra caliente”. Ésta zona tiene una altitud promedio de 345 msnm (Gómez, et al., 2011).

Éste distrito fue creado por decreto presidencial el 12 de abril de 1938 con una extensión inicial de 108,692 hectáreas totales, que comprendían los municipios de Apatzingán, Buenavista, Múgica, Gabriel Zamora, la Huacana, Parácuaro y Tepalcatepec. Dicho distrito es dividido en 13 módulos; en la zona del acuífero Apatzingán, solo se ven inmiscuidos 11 módulos, que son: 02, 03, 05, 5B, 06, 07, 08, 09, 10, 11 y 12.

1.4 FISIOGRAFÍA Y GEOMORFOLOGÍA

El área de estudio queda comprendida dentro de la provincia fisiográfica del eje Neovolcánico. Esta zona se caracteriza por ser netamente volcánica, ya que se eleva en cerros y lomeríos sobre los valles rellenos de cenizas y conglomerados, cuya altitud varía de 200 a 1500 msnm (CONAGUA, 2009).

El tipo de drenaje es dendrítico y paralelo, con corrientes de tipo intermitente que fluyen de las partes altas hacia el valle para depositar sus aguas en los ríos importantes de

corriente permanente como son: Tepalcatepec (Grande), Marqués, Cancita y Tesorero (CONAGUA, 2009).

1.5 CLIMA

El clima que predomina en esta región de Michoacán es de tipo seco (según la clasificación de Koppen, es un clima semi-seco semi-cálido); la zona que corresponde a la rivera del río Tepalcatepec presenta un clima seco muy cálido; hacia el norte y el sur (que es la parte montañosa), se tienen climas cálidos semi-húmedos y cálidos sub-húmedos con lluvias en verano (CONAGUA, 2009).

La temperatura media anual oscila entre los 24.8°C en mes de enero y los 31.5°C en el mes de mayo; por otra parte, se tiene una temperatura máxima de 39.6°C en el mes de mayo y una temperatura mínima de 16.6°C en el mes de enero (CICESE, 2015).

En esta región, la precipitación media en los meses lluviosos (junio – septiembre) es mayor a los 100mm, donde se puede encontrar una precipitación máxima mensual de 179mm en los meses de julio (CICESE, 2015).

Según CICESE (2015), la evapotranspiración máxima en esta zona es de 300mm en el mes de mayo, sin embargo, en este trabajo se calcula la serie de evapotranspiraciones por el método de Thorntwaite, con el cual se obtienen evapotranspiraciones potenciales mayores a 800mm en meses donde la temperatura asciende a más de 38°C.

1.6 HIDROGRAFÍA

Hidrográficamente, el acuífero Apatzingán se localiza en la Región Hidrológica No.18, que corresponde a las subcuencas del río Apatzingán, río Tepalcatepec y Arroyo Tepalcatepec, las cuales pertenecen a la cuenca del Río Balsas, una de las principales cuencas dentro de la República Mexicana, debido a la importancia de la corriente principal (CONAGUA, 2009).

Según en el informe de CONAGUA (2009), en la zona de estudio se localizan las presas derivadoras Piedras Blancas, El Llano, Las Burras y las presas de almacenamiento

Chilatán y los Olivos. Así mismo dentro de la periferia del acuífero discurren dos ríos principales: el río Tepalcatepec (o Grande), que corre de oeste a este y el río Márquez, que corre de norte a sur; ambos ríos descargan sus aguas en la presa Infiernillo.

1.7 GEOLOGÍA

La región que se localiza entre la transición del eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur es denominada como la depresión del Balsas, la cual fue formada por una distensión cortical terrestre que ocasionó un gran vacío dentro de las dos serranías, la edad aproximada de estos depósitos aluviales es de la época Holoceno (también conocida como era Reciente que es parte del periodo cuaternario de la era Cenozoica). Las rocas predominantes en la zona de estudio son los depósitos fluviales procedentes de la porción suroccidental de la Meseta Tarasca, por lo tanto estos cantos rodados tienen poco arredondamiento, dado que la distancia de transporte es pequeña, encontrando fragmentos angulosos y subangulosos; su edad es realmente corta, datan del Holoceno, teniendo como característica principal una porosidad y permeabilidad elevada y una baja compactación interna; estos depósitos descansan sobre un manto rocoso de origen volcánico (CONAGUA, 2009).

Se encuentra afectada la región por un gran intrusivo granodiorítico que ingresan a las rocas volcánicas que se depositaron, estas intrusiones generaron fallas y fracturas, las cuales fueron provocadas por esfuerzos tensionales debido al enfriamiento del intrusivo. Los derrames lávicos formaron las cadenas montañosas en los valles que originalmente habían sido cuencas lacustres profundas, donde se ha ido depositando material fluvial y lacustre derivado de las montañas y enormes cantidades de cenizas volcánicas de los volcanes más recientes (CONAGUA, 2009).

1.7.1 TIPO DE ACUÍFERO

Los abanicos fluviales y depósitos del valle funcionan como almacenamiento de un acuífero de tipo libre y semi-confinado según la zona. El intrusivo granítico de la región se considera de una porosidad y permeabilidad nula que funciona como una barrera

impermeable al flujo subterráneo aflorando al este y sur del área. Algunas de las rocas volcánicas que afloran en la región se consideran de baja permeabilidad, que presentan fracturamientos por donde se infiltra el agua, pudiendo aportar cierta recarga al valle pero en muy mínima proporción, no pudiendo impedir el paso del flujo subterráneo, a pesar de todo lo anterior, se encuentran rocas volcánicas que funcionan como barrera impermeable (CONAGUA, 2009).

Debido a las precipitaciones que se presentan en el valle y al norte de la zona, el agua se infiltra y llega a fluir, por lo que brota en esta zona por algunos manantiales, como son: Apatzingán, Buenavista y Parácuaro; por otra parte, el acuífero cuenta con zonas de recarga natural debido a los depósitos de aglomerados, gravas y arenas que con la permeabilidad con la que cuenta y tomando en cuenta la topografía, facilitan la infiltración del agua al manto acuífero (CONAGUA, 2009).

1.7.2 PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Tomando en cuenta las pruebas de bombeo que se realizaron en el acuífero, se determinó la transmisividad hidráulica de la zona, que oscila entre 2.5 a $17.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{día}$, por lo que se considera que el acuífero presenta transmisividades relativamente altas, lo que indica una gran permeabilidad; por otra parte, considerado la naturaleza de comportamiento de un acuífero semi-confinado, y a sabiendas de la presencia de rocas ígneas fracturadas y materiales granulares, se asignó un valor teórico de 0.01 para el coeficiente de almacenamiento para la modelación subterránea (CONAGUA, 2009).

1.7.3 PIEZOMETRÍA

Según el informe presentado por CONAGUA en 2009, sobre los niveles estáticos dentro de la zona del acuífero Apatzingán, se cuenta con un registro en 1982, en época de estiaje (diciembre), por lo que se puede asumir que los tales niveles ya nos son los actuales, debido al régimen de explotación que ha tenido el acuífero en los años subsecuentes; sin embargo, es importante contar con tal dato que, en ese entonces, presentaban niveles estáticos a una profundidad de 5 a 45 m.

1.7.4 APROVECHAMIENTOS SUBTERRÁNEOS

Como se mencionó anteriormente, el acuífero Apatzingán abastece los tres sectores de demanda principales (agrícola, urbano e industrial), a través de un total de 1230 pozos (REPDA, 2015), los cuales cuentan con concesiones otorgadas (tabla 3) por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA).

Tabla 3. Concesiones dentro del acuífero Apatzingán. (REPDA, 2013)

Sector	No. Pozos	%	hm ³
Agrícola	1058	86.02	254.10
Urbano	158	12.85	13.53
Industrial	14	1.14	0.803

2 MATERIALES

2.1 BASES DE DATOS

El término base de datos surgió en 1963 y en la informática, una base de datos consiste en una colección de datos interrelacionados y un conjunto de programas para acceder a dichos de datos. En otras palabras, una base de datos no es más que un conjunto de información (un conjunto de datos) relacionada que se encuentra agrupada o estructurada (Gómez, 2013).

En el desarrollo de este estudio es necesario la obtención y manipulación de múltiples materiales y herramientas, entre ellas información climatológica de la zona en estudio y cercana a esta, la utilización de cartas vectoriales con diversa información provenientes del INEGI, así como información de las estaciones hidrométricas obtenidas de la base de datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS, 2016); con toda esta información, se pueden conocer las características físicas, geográficas y climáticas en el acuíferos Apatzingán.

2.2 INFORMACIÓN DIGITAL DE INEGI

El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática es un organismo público autónomo, responsable de normar y coordinar el Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica, así como de captar y difundir información de México en cuanto al territorio, los recursos, la población y economía, que permita dar conocer las características de nuestro país y ayudar a la toma de decisiones. (INEGI, 2017), alguna de la información útil para el desarrollo de la presente tesis se muestra a continuación:

2.2.1 GENERADOR DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Para conocer el territorio mexicano, el instituto elabora información geográfica del relieve, la vegetación, clima, suelo y localidades, entre otros temas. Ésta la presenta mediante cartas impresas y cartografía digital. La información sobre las características del

territorio y medio ambiente que ofrece en cartas impresas y archivos digitales (INEGI, 2017) son:

- ⊕ Geodesia: Conjunto de datos obtenidos en todo el territorio nacional que permiten relacionarlo a un sistema de referencia con el fin de determinar la forma, extensión y dimensiones nacionales. Sirve de marco de referencia de los productos cartográficos del país y es la base que permite a la fotogrametría escalar, orientar y referenciar los rasgos plasmados en las fotografías aéreas.
- ⊕ Topografía: Información sobre la ubicación, forma y dimensiones de los rasgos naturales y las obras hechas por el hombre.
- ⊕ Toponimia: Son los nombres geográficos del país que permiten ubicar administrativa y geográficamente los lugares.
- ⊕ Recursos Naturales: Datos sobre la distribución y características de la vegetación, los tipos de suelos, el agua superficial y subterránea, las rocas y el clima.
- ⊕ Cartografía Urbana: Es la representación gráfica de todas las localidades con más de 2 500 habitantes, además de las cabeceras municipales existentes en el país, al momento de la realización de los diferentes eventos censales. Contiene desde 1990.
- ⊕ Marco Geoestadístico: Se utiliza para referenciar geográficamente la información estadística de los censos.
- ⊕ Catastro: Registro de las características de los predios a través de datos homogéneos, estructurados, organizados y relacionados, cuyo propósito final es la integración de una base cartográfica catastral nacional.
- ⊕ Fotogrametría: Es la ciencia, arte y tecnología para obtener información confiable acerca de los objetos físicos y del medio ambiente a través de procesos de grabación, medición e interpretación de las imágenes

fotográficas y patrones de grabación de energía electromagnética radiante y otros fenómenos.

2.2.1.1 CONTINUO DE ELEVACIONES MEXICANO 3.0

El Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) es un producto que representa las elevaciones del territorio continental mexicano, mediante valores que indican puntos sobre la superficie del terreno, cuya ubicación geográfica se encuentra definida por coordenadas (X, Y) a las que se le integran valores que representan las elevaciones (Z). Los puntos se encuentran espaciados y distribuidos de modo regular. (INEGI, 2017) Estos modelos digitales se pueden descargar con resoluciones de 15, 30, 60, 90 y 120 m.

Un modelo digital de elevaciones (MDE) se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, 1994).

En este caso la palabra elevación enfatiza el concepto de medición de altura con respecto a un datum y la generación por parte del modelo de valores absolutos de altura. Este término se utiliza con frecuencia en los Estados Unidos para describir un arreglo rectangular o hexagonal de puntos con valores de elevación obtenidos por métodos fotogramétricos o cartográficos (Fallas, 2007).

2.2.1.2 INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES

Los shapes con información de uso de suelo ayudan a representar de forma gráfica, la cobertura y distribución de los diferentes usos que se le da al suelo. Por otra parte los que contienen información edafológica dan una descripción del suelo, mostrándonos sus características morfológicas y propiedades físicas y químicas, lo que dará la pauta para poder tener las características para la modelación superficial y subterránea.

2.3 CLICOM

La información meteorológica con que se trabajó la zona de estudio, fue obtenida de la base de datos CLICOM (Climate Computing Project), que es un sistema de software de

manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas y administrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en México, el cual ayuda a conocer la ubicación espacial de cada estación climatológica en la república mexicana, así como toda la información que contiene cada estación meteorológica. Las observaciones representan los datos recopilados en las diferentes estaciones del país, con diferentes periodos de información, pudiendo encontrar datos desde 1920 a 2012. Este programa ayuda a hacer una elección preliminar de las estaciones a utilizar en el estudio, así como a descargar la información climática directamente a hojas de Excel para hacer la manipulación de datos y hacer una elección final de las mejores estaciones para un estudio en específico (CICESE, 2015).

2.4 REPDA

La CONAGUA, cuenta con un sistema de concesiones y asignaciones de agua superficial y subterránea regidos por la Ley de Aguas Nacionales (LAN), cuyo proceso implica la elaboración de Títulos y la solicitud de su inscripción en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), a efecto de otorgar seguridad jurídica a los particulares a través de la inscripción oportuna y confiable de las concesiones, emitir la información estadística, así como permitir la consulta pública. Esto también permite evitar o mitigar la sobreexplotación de acuíferos, disminuir la contaminación por descargas de aguas residuales a cuerpos de jurisdicción federal, custodiar las zonas federales y controlar la extracción de materiales pétreos (IMTA, 2017).

El REPDA proporciona información y seguridad jurídica a los usuarios de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes, a través de la inscripción de los títulos de concesión, asignación y permisos de descarga, haciendo constar la titularidad de los derechos inscritos y los cambios en sus características. Su principal objetivo es registrar y resolver consultas en forma eficaz, sobre los derechos de los usuarios en materia de aguas nacionales que compete administrar a la Comisión Nacional del Agua (REPDA, 2017).

2.5 BANDAS

El manejo digital de la información hidrométrica es de suma importancia para la gestión del recurso hídrico del país, por tal motivo, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) ha venido actualizando el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra la red hidrométrica nacional. En esta red se registra el nivel de agua (escalas) y la cantidad de agua que pasa a una determinada hora (aforos) en los principales ríos de la República Mexicana (IMTA, 2017).

Cuenta con los datos de 2,070 estaciones hidrométricas, las cuales son el resultado de una depuración al catálogo BANDAS hecho en 2008 por la Conagua y el IMTA. Aproximadamente 480 estaciones fueron actualizadas hasta el año 2006 y tiene registradas 180 presas (IMTA, 2017). La información que se requiere y la cual puede ser encontrada en las estaciones hidrométricas que proporciona BANDAS son:

- ⊕ Valores diarios: Gasto medio diario (m³/s) día 1 a día 29-31.
- ⊕ Valores mensuales: Se incluyen la hora y el día del gasto máximo y el gasto mínimo (m³/s). Además de la lectura de volumen máximo y medio de escurrimientos (miles de m³), sedimentos (miles de m³) y la lectura del día y hora de las escalas para el gasto mínimo, medio y máximo.
- ⊕ Valores anuales: Menciona el mes, día y hora en que ocurre el gasto máximo y gasto mínimo (m³/s). La lectura de escala para el gasto máximo y mínimo (m), además del volumen anual de escurrimientos (miles de m³), gasto medio anual (m³/s) y volumen anual de sedimentos (miles de m³).

2.6 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un conjunto de “hardware”, “software”, datos geográficos y personal capacitado, organizados para capturar, almacenar, consultar, analizar y presentar todo tipo de información que pueda tener una referencia geográfica del mundo real (Puerta, et al., 2011).

Con un SIG se puede organizar y administrar los datos de tal forma que la información sea fácilmente accesible a los usuarios, donde, se puedan vincular diversas bases de datos sin importar el gran volumen de datos espacialmente referenciados (INEGI, 2014).

Un SIG es una base de datos espacial; los formatos de almacenamiento de datos pueden ser de dos tipos de formatos raster (archivo de imagen) y vectorial o shape (cobertura) (Puerta, et al., 2011).

La importancia de los SIG radica en la integración de la información espacial y de otros tipos, aunado a esto, éste tipo de software ofrece un marco consistente de análisis para los datos geográficamente referenciados, además de nuevas y novedosas formas para manipular y desplegar datos; su característica más importante es permitir la visualización y el análisis de datos con base en las relaciones y proximidad geográficas con una operación bastante rápida, así como la capacidad de implementar modelos de aplicación (INEGI, 2014).

Los Sistemas de Información Geográfica pueden ser aplicados en caso de catastro, planificación urbana, rutas de transporte, gestión de servicios, cartografía, planificación comercial, evaluación de riesgos y emergencias, estudios sociológicos y demográficos, impacto ambiental y gestión de recursos naturales, siendo éste último el de mayor interés para este trabajo.

2.6.1 ARCGIS

ArcGIS es un “software” de Sistema de Información Geográfica diseñado por la empresa californiana Environmental Systems Research Institute (ESRI) para trabajar a nivel multiusuario (Puerta, et al., 2011).

Bajo el nombre genérico ArcGIS se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica.

Básicamente, ArcGis trabaja con dos tipos de datos: raster y vectoriales.

FORMATO RÁSTER

Éste formato presupone el dividir el espacio geográfico en elementos discretos, de forma regular, contigua y mutuamente exclusiva e indivisible; éste es una representación en forma de malla y cada elemento adopta un valor único por cada atributo.

Un raster es una estructura de datos simple, facilidad de combinar capas con datos de sensores remotos y facilidad de análisis espacial; su principal es que contiene un gran volumen de información, lo que puede retrasar los procesos o confundir los resultados.

FORMATO VECTORIAL

Los formatos vectoriales o shapes asumen un espacio continuo, de acuerdo a la geometría euclidiana, existen tres tipos de objetos:

- ⊕ Objetos puntuales son representados por un par de coordenadas x,y.
- ⊕ Objetos lineales que son representados mediante segmentos que se conectan en vértices, y se representan con las coordenadas x,y, de éstos vértices.
- ⊕ Polígonos, que son áreas que quedan representados por las líneas que los delimitan.

Las principales ventajas que tienen este tipo de archivos son una compacta y buena representación de estructura de datos, así como la topología que puede ser descrita

mediante redes de uniones. Por otra parte, sabemos que la estructura de datos es compleja, por lo que conlleva una dificultad al momento de construir simulaciones.

2.7 MODELOS MATEMÁTICOS

Los procesos hidrológicos involucrados en la transformación lluvia-caudal han sido ampliamente estudiados para desarrollo del conocimiento de los procesos reales que son ciertamente complejos, los cuales involucran gran cantidad de mecanismos y en general se los simula mediante modelos que contemplan distintos grados de aproximación a la dinámica física del mecanismo (Riccardi, 1997).

Generalmente, los modelos matemáticos se basan en analogías con los procesos reales, pero no son físicamente realistas a nivel de detalle de los procesos. Generalmente las simulaciones son por eventos, generando resultados en los intervalos de tiempo en que se divide el tiempo total del evento (Riccardi, 1997).

Una primera aproximación corresponde a los comúnmente llamados de caja negra, que son aquellos que operan basados en la conversión de un estímulo o señal de entrada (lluvia) a una señal de salida (caudal) mediante un determinado algoritmo de transformación, sin una explicitación de los mecanismos físicos reales de los procesos (Riccardi, 1997).

La segunda aproximación corresponde a los modelos de dos componentes. El primer componente evalúa la abstracción de las pérdidas producidas, en el que se cuantifica la porción de lluvia total caída que se vio afectada por los procesos de interceptación, almacenamiento superficial, evaporación e infiltración. El remanente de lluvia corresponde al escurrimiento superficial y su movimiento se evalúa mediante un modelo de tránsito, el cual cuantifica el retardo y atenuación de la onda de crecida conformada por los múltiples aportes de la cuenca (Riccardi, 1997).

El tercer nivel de aproximación corresponde a los modelos matemáticos basados en el modelo de procesos físicos. En este tipo de modelos se identifican y evalúan

matemáticamente gran parte de los procesos presentes en el ciclo hidrológico. Existe una amplia variedad de este tipo de modelos, difiriendo en el grado de contemplación y despreciación de los procesos físicos. Estos modelos pueden ser operados por eventos o en largos períodos de tiempo (meses, años), con intervalos temporales a diferente escala. La información antecedente de cada evento puede ser generada dentro del proceso de simulación temporalmente continua (Riccardi, 1997).

En todos los casos, los modelos deben ser calibrados en función de información disponible al menos de lluvia caída en la cuenca y caudal saliente. La consideración de la distribución areal de las variables hidrológicas contempladas en la modelación se realiza mediante la subdivisión de la cuenca en subcuencas vinculadas (microcuencas) (Riccardi, 1997).

2.7.1 MODELO DE SIMULACIÓN SUPERFICIAL: EVALHID

Para realizar la simulación superficial, se utiliza el software EvalHid, con él se puede obtener el balance hídrico de la zona en estudio, considerando los escurrimientos y las recargas generadas en las cuencas de simulación de la zona de estudio.

El programa EVALuación de los recursos HÍDricos (EvalHid) es un módulo informático para el desarrollo de Modelos Precipitación-Escorrentía (MPE) en cuencas complejas, que tiene como fin el evaluar la cantidad de recurso hídrico que producen las mismas. El módulo consta de varios tipos de modelos que se pueden escoger en función de los datos disponibles, la complejidad de la cuenca y la práctica del usuario en el desarrollo y calibración de modelos hidrológicos. Todos los modelos disponibles son del tipo agregado con aplicación semidistribuida. El Software EvalHid desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia puede utilizar los modelos de Témez, HBV y Sacramento, donde los dos últimos pueden realizar modelación del proceso de derretimiento de nieve (Paredes, et al., 2014).

La modelación precipitación escorrentía no es sencilla y suele ser complicado la calibración de diversos parámetros, sobre todo cuando los datos son escasos o poco fiables.

TÉMEZ

El modelo de Témez es un modelo determinista lluvia escurrimiento que funciona como semidistribuido al hacer la discretización a través de microcuencas. El modelo tiene 4 parámetros para calibrar: infiltración máxima, humedad máxima, coeficiente de inicio de excedente y el coeficiente de descarga alfa (Temez, 1977).

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

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

HBV

Según Paredes (2014), el modelo hidrológico HBV es un modelo conceptual y agregado de precipitación esorrentía ampliamente empleado en previsiones hidrológicas y en estudios de balance hídrico, que ha sido aplicado en más de 30 países. Pertenece a la clase de modelos que tratan de abarcar los procesos más importantes de generación de esorrentía empleando una estructura simple y robusta, y un pequeño número de parámetros. Fue originariamente desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) para predecir la esorrentía a centrales hidroeléctricas en 1970 pero el alcance de sus aplicaciones se ha ido incrementando continuamente. El modelo ha estado sujeto a modificaciones a lo largo del tiempo y, aunque su filosofía básica no ha cambiado, existen nuevos códigos que se encuentran en constante desarrollo por diferentes grupos y que varían en su complejidad.

El modelo consta de cuatro módulos o rutinas principales: un módulo de fusión y acumulación de nieve, un módulo de humedad del suelo y precipitación efectiva, un módulo de evapotranspiración y por último un módulo de estimación de escorrentía. El modelo puede ejecutarse a escala temporal diaria o mensual y los datos de entrada necesarios incluyen: series de precipitación y temperatura observadas en cada paso de tiempo y estimaciones a largo plazo de la temperatura y evapotranspiración media mensual.

SACRAMENTO

El modelo hidrológico Sacramento, denominado en muchos casos SAC-SMA model, fue desarrollado por Burnash y Ferral (1973). El modelo Sacramento es un intento de parametrizar las características de humedad en el suelo tal que: se distribuya la humedad en varios niveles de forma lógica, tenga unas características de percolación racionales y permita una efectiva simulación del caudal del río. Este modelo permite la estimación de la escorrentía de una cuenca a partir de la precipitación, la evapotranspiración potencial, la superficie de la cuenca y un conjunto de parámetros. Además, como sistema conceptual que es, intenta representar en detalle el ciclo hidrológico mediante la división del terreno en diferentes compartimentos, o estanques, que representan diferentes procesos del ciclo. Dentro de los modelos precipitación escorrentía el modelo Sacramento se puede clasificar como conceptual, continuo, determinístico, de entradas agrupadas, número alto de parámetros y sólo cuantitativo.

2.7.2 MODELO DE SIMULACIÓN SUBTERRÁNEA: AQUIVAL

AQUIVAL es un módulo para el preproceso y simulación de acuíferos que se encuentra incorporado al sistema soporte de decisión para la planificación y gestión de recursos hidráulicos, llamado AQUATOOL. Éste módulo, permite la integración de modelos de acuífero previamente calibrados en la simulación de recursos hidráulicos (Manual de Usuario AQUIVAL 2, 2012).

AQUIVAL ayuda al usuario en la modelización por el método de los Autovalores, en el que se puede incluir el modelo de flujo subterráneo en un modelo complejo de gestión y simular muchas alternativas para largos periodos de tiempo.

El método de Autovalores da lugar a una solución explícita en el tiempo. La definición de “acciones elementales” y “parámetros de control”, contribuye a una mayor eficiencia computacional del método. Mediante las “acciones elementales” se definen los tipos de acciones a las que se somete al acuífero, como pueden ser recarga por lluvia, bombeos, retornos de riego, etc. Con los “parámetros de control” se definen las variables cuyo seguimiento puede ser interesante, ya sea a efectos de información o a efectos de influir en la gestión que se realice del acuífero (Manual de Usuario AQUIVAL 2, 2012).

Los datos hidrodinámicos necesarios para aplicar el método descrito necesitan de una calibración, que puede realizarse mediante modelos matemáticos en diferencias finitas o elementos finitos. Esto es debido a que el modelo de Autovalores no es, en principio, eficaz en la obtención de esta calibración (Manual de Usuario AQUIVAL 2, 2012).

3 METODOLOGÍA

3.1 GENERACIÓN DE CUENCAS

Como primer paso, para poder delimitar la zona de estudio, se utiliza el SIG ArcGis, donde se importa el acuífero Apatzingán desde un archivo shape, obtenido de la base de datos de geoinformación de la CONABIO (CONABIO, 2016), obteniendo la dimensión real del acuífero de interés.

Sobre el acuífero se generan cuencas hidrográficas, cuyos puntos de descarga se corresponden con las estaciones hidrométricas de la zona (obtenidas por la base de datos de la CONAGUA).

En este punto, es importante reconocer que las cuencas a utilizar para la simulación hidrológica, pueden mantenerse como una única cuenca unicelular o como un conjunto de microcuencas; utilizar microcuencas ayuda en el proceso de simulación y calibración superficial, ya que suele existir discrepancia en los resultados debido a escala de simulación y el uso agregado de las características morfológicas e hidrológicas de las cuencas de trabajo.

Es importante considerar que las cuencas generadas a partir de un punto de salida (dado por las estaciones hidrométricas que registran los datos observados, útiles para la calibración), deben ser suficientemente grandes como para abarcar toda la superficie del acuífero analizado, para así considerar la totalidad de la recarga que se genera a través de ellas.

3.2 GESTIÓN DE DATOS

3.2.1 OBTENCIÓN DE ESTACIONES Y DATOS

A partir de la base de datos CLICOM (CICESE, 2015) se han obtenido las estaciones meteorológicas presentes en la zona en estudio. Estas estaciones deben ser manipuladas para su correcto uso, por lo que en primer lugar se requiere que dichas estaciones tengan un porcentaje de influencia sobre las cuencas de simulación (en este punto del trabajo la

zona de estudio se referirá al conjunto de cuencas de simulación). Esta influencia es medida (para cada cuenca de simulación) por el porcentaje de área generada por los polígonos de Thiessen que dibujan las estaciones meteorológicas.

3.2.2 SELECCIÓN DE ESTACIONES

Para la selección de estaciones, se realizan pruebas de consistencia de datos como son homogeneidad e independencia, con lo que se determina si cada estación puede ser utilizada. Aunado a esto, se deben considerar las características espaciales propias de cada cuenca (longitud y latitud), así como las características de los datos de la estación, pudiendo obtener los años (tanto en servicio como efectivos), así como el porcentaje de datos vacíos que se presentan en las series de las estaciones analizadas.

Es importante recordar que la selección de estaciones considera que se tenga un porcentaje de vacíos bajo de tal forma que al momento de realizar la gestión de datos y el llenado de estaciones, la serie de la estación no se vea afectada por el llenado de datos a partir de otras estaciones cercanas, sino que la serie sea estadísticamente independiente.

3.2.3 PRUEBAS EN LAS ESTACIONES

Una serie de datos meteorológicos se considera consistente siempre y cuando cumpla con las condiciones de Aleatoriedad, Homogeneidad, Independencia y Estacionalidad (Merlos, et al., 2014). Las estaciones deben ser consideradas adecuadas dependiendo de su consistencia e independencia principalmente.

La información requerida para la realización de pruebas de consistencia (aleatoriedad, homogeneidad e independencia) en las series de datos de las estaciones, son precipitación y temperatura.

La homogeneidad se cumple si todos los valores que conforman la muestra provienen estadísticamente de una misma población; de la misma forma, la independencia implica la probabilidad de ocurrencia de cualquier dato no depende de la ocurrencia de algún otro valor precedente.

Las pruebas de consistencia que se realizan a los datos de precipitación en este trabajo son los siguientes:

- ⊕ Para homogeneidad: Prueba de Secuencias y Test de Helmert.
- ⊕ Para independencia: Límites de Anderson.

3.2.3.1 ANÁLISIS DE CONSISTENCIA

El proceso de consistencia de los datos, permite identificar estaciones con información aceptable y es utilizada con la finalidad de validar o rechazar la información meteorológica de la estación analizada. Esto es necesario para conocer si las series de datos son independientes y homogéneas. Para conocer la consistencia de los datos se realizaron pruebas a cada serie.

Según la bibliografía consultada (Salas, et al., 1980) una serie independiente es aquella que no tiene ninguna dependencia en el tiempo o en el espacio; por otra parte, una serie original de datos son aquellos que se encuentran disponibles antes de que realice cualquier análisis sobre ésta.

Las series hidrológicas pueden dividirse en 2 grupos básicos: serie de tiempo simple en un específico punto y múltiples series de tiempo en varios puntos o múltiples series de tiempo de diferente tipo en un punto.

Las series de tiempo simple son las series anuales de precipitación y las series mensuales de escurrimiento medidas en una estación hidrométrica; las series simples también son llamadas series invariables (Salas, et al., 1980).

3.2.3.1.1 PRUEBA DE SECUENCIAS

Esta prueba consiste en analizar el signo de las desviaciones con respecto a la mediana muestral para cada dato y comparar el número de cambios permitidos (u) en base al tamaño de la muestra (n). Si el número de cambios está entre los valores establecidos en la tabla 4, la serie de datos se considera homogénea.

Tabla 4. Tabla que relaciona el número de datos con el número de cambios permitidos para el test de secuencias.

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	16 - 23	80	35 - 47
20	8 - 13	30	12 - 19	40	16 - 25	100	45 - 57

3.2.3.1.2 TEST DE HELMERT

Consiste en un procedimiento sencillo donde se debe ordenar la serie en función del tiempo y analizar el signo de las desviaciones con respecto a la media aritmética de la serie. Si una desviación de un cierto signo es seguida por otra del mismo signo, entonces se dice que se forma una secuencia “S”; si se presenta el caso contrario, se considera un cambio “C”. Para comprobar que la serie es homogénea se aplica el siguiente criterio:

$$-\sqrt{n-1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n-1}$$

3.2.3.1.3 LÍMITES DE ANDERSON

Para una serie independiente, la población del correlograma es igual a cero, para $k \neq 0$. Sin embargo series temporales independientes, presentan variabilidad de la muestra, conteniendo fluctuaciones de alrededor de cero, pero estos no son necesariamente cero. En este caso, lo que se hace para determinar los límites de probabilidad de series independientes, es utilizar los límites de Anderson, considerando un 95% de nivel de confianza.

Si menos del 10% de los valores de autocorrelación calculados superan los límites, se dice que a serie de datos es independiente.

$$r_{k(95\%)} = \frac{-1 \pm \sqrt{n_j - k - 1}}{n_j - k}$$

3.2.4 MATRIZ DE CORRELACIÓN

La matriz de correlación sirve para poder conocer las estaciones que servirán de apoyo para realizar el llenado de vacíos en las estaciones principales. Para este caso, es importante que no exista una alta variación entre los valores precipitación media anual de una estación y otra, por lo que se propone que el coeficiente de correlación debe ser mayor a 0.75. Dicha similitud es importante, ya que de acuerdo a este resultado serán seleccionadas las estaciones secundarias, evitando la discrepancia de datos.

Ahora bien, se debe procurar que no solo una estación tenga correlación con otra; de ahí la importancia de tener más estaciones, ya que, como es bien sabido, en México se cuenta con deficiencia en las series de datos de precipitación, por lo que es importante poder utilizar varias estaciones para el llenado de otra y no solamente la estación más próxima. Lo anterior es debido a que al tener menos datos, se estaría realizando una traslación espacial de datos entre estaciones, sin tomar en cuenta otras estaciones circundantes, con las cuales se puede obtener una media ponderada, como en el caso del método del Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDW), con el cual es posible obtener resultados más precisos.

3.2.5 PERIODO DE AÑOS DE ESTUDIO

Es necesario tener claro el periodo de datos con los que se realizará la modelación superficial; el cual se obtiene de los datos de todas las estaciones meteorológicas existentes en la zona de estudio. A partir de esto, surge una limitante importante, ya que en muchas ocasiones los períodos de registro en las distintas estaciones no se corresponden.

Dado que las series requeridas como datos de entrada para el software EvalHid son las de precipitación, temperatura y evapotranspiración, es necesario que se tenga en cuenta que estas deben de tenerse el mismo periodo tiempo de registro y a su vez, el periodo debe de coincidir con el de la serie de datos de las estaciones hidrométricas.

Hay que considerar que cualquiera que sea el método que se use para el llenado de datos faltantes, las series de precipitación se verán afectadas, razón por lo que se debe

entender que se está introduciendo incertidumbre en los datos que ellas registran, así como comprender el impacto que puede llegar a tener sobre los resultados de simulación, al tratarse de datos manipulados.

3.2.6 LLENADO DE ESTACIONES DE PRECIPITACIÓN

Uno de los principales problemas que existen con las estaciones hidrológicas es la falta de información (en suficiente cantidad y calidad), es por ello que en repetidas ocasiones sus series presentan días, meses e incluso años vacíos.

Para poder realizar la modelación superficial de una cuenca, se debe contar con una serie de precipitación a lo largo de los años de forma completa. Es por ello que la problemática del conocimiento de las cantidades precipitadas y su análisis espacial es de inmensa importancia, ya que trata de establecer las relaciones existentes entre los valores puntuales, registrados en diferentes estaciones, así como la interacción con la cuenca en estudio.

Esto se consigue a través de métodos de distribución espacial, permitiendo extrapolar la información puntual de una estación meteorológica a un espacio más extenso, con el fin de obtener la precipitación de la superficie en estudio. Algunos de los métodos que pueden ser utilizados para el llenado de estaciones son:

- ⊕ Media Aritmética
- ⊕ Polígonos de Thiessen
- ⊕ Isoyetas
- ⊕ Thiessen Modificado
- ⊕ Inverso de la Distancia al Cuadrado.

A continuación se realiza una comparativa en los distintos métodos.

3.2.6.1 MEDIA ARITMÉTICA

La Media Aritmética consiste en calcular el promedio de los datos pluviométricos puntuales de estaciones ubicadas en un área geográfica determinada. La principal carencia

del método es no considerar características anexas que pueden influir en las precipitaciones, como podría ser la presencia de cordones montañosos, cercanía a océanos, condiciones atmosféricas predominantes u otras, así como la distribución espacial de las estaciones meteorológicas en estudio (Pizarro, et al., 2003).

3.2.6.2 POLÍGONOS DE THIESSEN

Además de la información pluviométrica, requiere para su ejecución sólo de la ubicación espacial de las estaciones. A cada estación se le asigna una superficie, la cual es obtenida representando las estaciones en un plano y uniéndolas a través de rectas. A estas rectas posteriormente se les trazan sus mediatrices hasta que se intersectan entre sí. Con los límites del área en estudio y los que definen las mediatrices se obtiene la superficie de influencia para cada estación. El principal error del método radica en que sólo considera el posicionamiento de las estaciones y una superficie plana de influencia para cada una, sin considerar las diferencias topográficas que se pueden presentar. Además, asume que la precipitación de la estación es la misma de la zona que representa geoméricamente, lo cual no siempre es cierto. Sin embargo, al ponderar cada estación por diferentes superficies, hipotéticamente sus resultados deberían ser más precisos que el método de la Media Aritmética (Pizarro, et al., 2003).

3.2.6.3 ISOYETAS

Para la ejecución del método de las isoyetas, es necesario disponer, además de las mediciones de precipitación en los períodos de interés y de las ubicaciones de los puntos de observación, de las precipitaciones normales de cada estación, del material cartográfico correspondiente y de un conocimiento espacial y atmosférico lo más detallado posible de las áreas consideradas. Al incorporar factores de la zona y de las precipitaciones, debería ser el mejor de los cinco métodos, pero a la vez tiene un alto grado de subjetividad dado por la experiencia y acceso a la información que posea el técnico encargado de la construcción de estas curvas (Pizarro, et al., 2003).

3.2.6.4 THIESSEN MODIFICADO

Este método es una mezcla de los polígonos de Thiessen y las Isoyetas, y debiera presentar resultados bastante buenos. Entre la información que necesita para su puesta en práctica, además de los polígonos de Thiessen está la existencia previa de isoyetas. Este requisito condiciona bastante al método, debido a que su exactitud dependerá fuertemente de la calidad de esta información pluvial. Este método se basa en los dos últimos métodos descritos. El mayor inconveniente en el método radica en la posible variación de cantidad o ubicación de las estaciones lo que conlleva a un ajuste de la representación gráfica y, por ende, a actualizar las mediciones de los polígonos, con los inconvenientes y nuevos cálculos asociados que ello demanda (Pizarro, et al., 2003).

3.2.6.5 INVERSO DE LA DISTANCIA AL CUADRADO

El método de Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDC) es el más reciente entre los que se han analizado, y su importancia radica en la fácil aplicación. El método IDC es similar al método de la Media Aritmética, pero con el agregado de una ponderación por distancia euclidiana. Dicha ponderación, al tener un factor cuadrático, recibe una influencia bastante fuerte del monto pluvial de las estaciones más cercanas y al considerar una serie o variedad de puntos de estimación puede formar agrupaciones concéntricas de los montos estimados en torno a las estaciones (Pizarro, et al., 2003).

La distancia euclidiana en este caso considera la diferencia de longitud, latitud y elevación entre las estaciones meteorológicas en estudio.

Para este método, el valor que encontramos depende de la correlación que tengamos entre las estaciones en estudio, es por ello que el número de estaciones utilizadas varía de acuerdo a la correlación y a la existencia del dato faltante en la estación de apoyo.

Las fórmulas que se utilizan para el método son las siguientes, la primera es para la determinación de la distancia euclidiana y la segunda para obtener el dato faltante en un mes para una estación.

$$do_1 = \sqrt{(x_o - x_1)^2 + (y_o - y_1)^2 + (z_o - z_1)^2}$$

$$P1 = \frac{EP2 \frac{1}{do_1}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{do_i^2}} + \frac{EP3 \frac{1}{do_2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{do_i^2}} + \frac{ES1 \frac{1}{do_3}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{do_i^2}} + \dots + \frac{ESi \frac{1}{do_n}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{do_i^2}}$$

Donde:

do= distancia euclidiana (m).

EP= valor de la precipitación en la estación principal (mm)

ES= valor de la precipitación en la estación secundaria (mm)

3.2.7 SERIES DE TEMPERATURA

Para las series de temperatura, es importante tomar en cuenta el número de años con los que se trabaja en las series de precipitación y temperatura, ya que aparte de que son las series con las que se trabaja para obtener la evapotranspiración, también son las series que debemos introducir al software EvalHid para obtener las recargas al acuífero.

Es por ello que el método que se utiliza es de media aritmética, lo que quiere decir que se realiza el llenado de la serie por medio de promedios, ya que podemos suponer que no cambian en el tiempo las condiciones climatológicas de la zona.

3.2.8 SERIES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay forma sencilla de separar ambos procesos, por lo que al flujo de vapor de agua desde una cubierta vegetal se le denomina de forma general evapotranspiración, lo que quiere decir que toma en cuenta los dos procesos ocurridos.

La estimación precisa de la evapotranspiración no es una tarea simple. Los procedimientos requieren el control continuo de un gran número de parámetros físicos, meteorológicos y de la cubierta vegetal (Aparicio, 1992).

En México se usan fundamentalmente dos métodos para el cálculo del uso consuntivo:

- ⊕ Thorntwaite
- ⊕ Blaney-Criddle

EL primero, por tomar en cuenta sólo la temperatura media mensual, arroja resultados estimativos que pueden usarse únicamente en estudios preliminares o de gran visión, mientras que el segundo es aplicable a casos más específicos (Aparicio,1992).

3.2.8.1 MÉTODO DE THORNTWAITE

Este método, desarrollado en 1944, calcula el uso consuntivo mensual como una función de las temperaturas medias anuales, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$U_j = 1.6K_a \left(\frac{10T_j}{I} \right)^a$$

Donde:

U_j = uso consuntivo en el mes j, en cm.

T_j = temperatura media en el mes j, en °C.

a, I= constantes.

K_a = constante que depende de la latitud y el mes del año.

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j$$

Donde:

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514}$$

y j= número de mes.

$$a = 675 \times 10^{-9}I^3 - 771 \times 10^{-7}I^2 + 179 \times 10^{-4}I + 0.492$$

3.2.8.2 MÉTODO DE BLANEY-CRIDDLE

En este método se toma en cuenta, además de la temperatura y las horas de sol diarias, el tipo de cultivo, la duración de su ciclo vegetativo, la temporada de siembra y la zona (Aparicio, 1992).

Si se desea estimar la evapotranspiración durante un ciclo vegetativo completo, se puede emplear la siguiente fórmula:

$$E_t = K_g F$$

Donde:

E_t = evapotranspiración durante el ciclo vegetativo, cm.

F = factor de temperatura y luminosidad.

K_g = coeficiente global de desarrollo.

El factor de temperatura y luminosidad F se calcula como:

$$F = \sum_{i=1}^n f_i$$

Donde:

$$f_i = P_i \left(\frac{T_j + 17.8}{21.8} \right)$$

P_i = porcentaje de horas sol del mes i con respecto al año

T_j = temperatura media del mes i en °C.

El ciclo vegetativo de un cultivo es el tiempo que transcurre entre la siembra y la cosecha y, por supuesto, varía de cultivo a cultivo, y, el coeficiente global de desarrollo K_g varía entre 0.5 y 1.2 (Aparicio, 1992).

3.3 EVALHID

La evaluación del recurso hídrico es un aspecto fundamental de la planificación y gestión de recursos hídricos. Básicamente existen dos metodologías para evaluar el recurso hídrico: la restitución a régimen natural y la modelación de precipitación-escorrentía. Ambas metodologías suelen ser complementarias y necesarias (Paredes, et al., 2014).

EvalHid es un módulo informático que permite el desarrollo de modelos precipitación-escorrentía en cuencas complejas y con el objetivo de evaluar la cantidad de recurso hídrico que producen las mismas (Paredes, et al., 2014).

Todos los modelos con los que cuenta el software son del tipo agregado con aplicación semi-distribuida.

Dado que las cuencas modeladas pueden ser subdivididas en subcuencas o microcuencas, es importante que cada cuenca cuente con su serie de precipitación, evapotranspiración y temperatura, así como el área de estudio. Para poder comparar los resultados, y, de esta forma poder calibrar el modelo de acuerdo a los parámetros con los que se cuenta; por lo que es imprescindible contar con una serie de datos aforados provenientes de una estación hidrométrica; este es el punto que genera conflicto en la zona de estudio, ya que los datos con los que se cuenta carecen de fiabilidad y, es por ello que muchas de las simulaciones e incluso calibraciones no son correctas; así mismo, al momento de realizar una restitución a régimen natural no se cuentan con los datos necesarios para lograrlo de la forma más adecuada; como parte trascendental de la calibración, es importante mencionar los datos que se utilizaron para realizarla fueron obtenidas de esta forma, restituidas. En la figura 1, se presenta el esquema simplificado del programa; donde se puede ver que con las series de datos antes mencionadas y seleccionando el modelo adecuado, se obtienen series de escurrimientos simuladas correctamente.

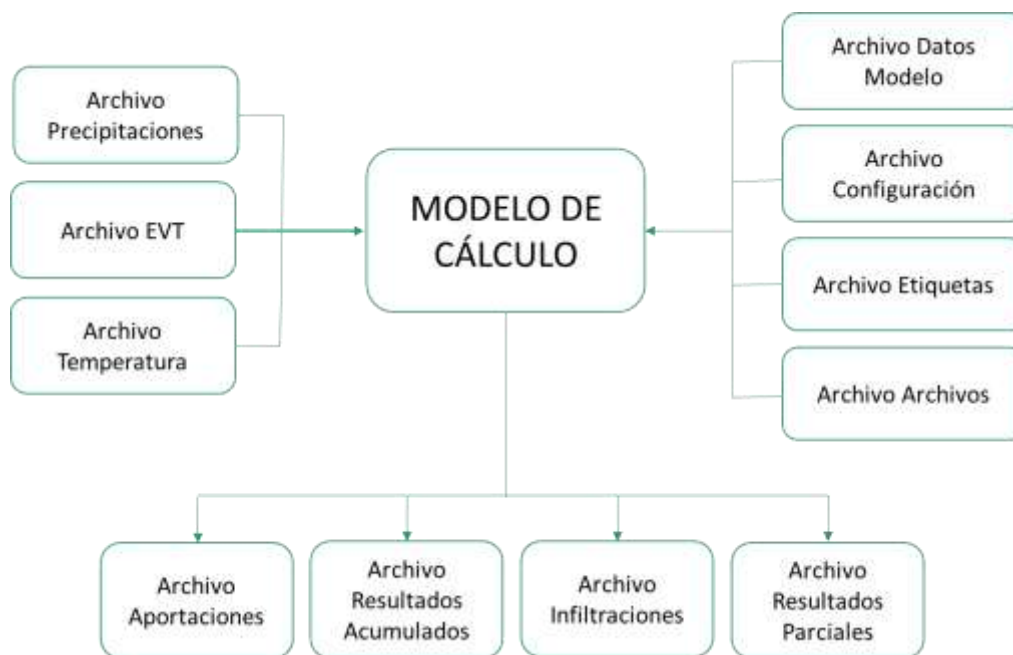


Figura 1. Modelo de Cálculo del software EvalHid.

Una de las características principales del programa es la aplicación de diferentes modelos Precipitación-Escorrentamiento según diferentes factores; permite el desarrollo de modelos para grandes cuencas y sistemas complejos, con escala temporal configurable y definida por el usuario; así como la capacidad de modelar la parte superficial estimando la infiltración como salida del programa.

Es importante apreciar que además de contar con archivos de series temporales (precipitación, temperatura, EVT) es necesario contar con un archivo de datos de modelo, configuración y etiquetas; donde, adicionalmente si se quiere cambiar algún nombre de archivo de los que vienen por defecto, se puede crear el archivo de archivos para éste propósito (Paredes, et al., 2014).

El archivo datos del modelo contiene toda la información de los modelos a desarrollar como son: número de modelos, nombres, tipo de modelos, parámetros, etc.

En el archivo de etiquetas se encuentra diferente información sobre errores y otros avisos que el programa emplea para avisar al usuario sobre posibles incidencias. El resto de

los archivos de entrada pueden ser generados a mano o con la interfaz del programa (Paredes, et al., 2014).

Como salida del programa, se tienen varios archivos de resultados parciales, acumulados, aportaciones e incluso infiltraciones.

- ⊕ El archivo de Resultados Parciales contiene para cada subcuenca modelada, los diferentes resultados temporales de las variables de estado y de flujo según el modelo seleccionado.
- ⊕ El archivo de Acumulados presenta la acumulación temporal de algunas de estas variables.
- ⊕ El archivo de Aportaciones recoge, para la escala temporal definida en la acumulación, la escorrentía total acumulada en cada uno de los puntos de desagüe superficial definidos.
- ⊕ De la misma forma, el archivo de Infiltraciones recoge las infiltraciones acumuladas temporalmente en los puntos de acumulación subterránea.

De los diferentes modelos disponibles en el programa, se eligió el modelo Témez, ya que es un modelo de pocos parámetros con una larga trayectoria de aplicación en España y México para los recursos hídricos; de tal forma, se sabe que existe suficiente experiencia en su aplicación como para que tenga interés su consideración (Paredes, et al., 2014).

Es importante mencionar que debido al bajo número de parámetros que se requieren para la calibración del mismo, este modelo es el más adecuado para utilizar en México, ya que, debido a la escasez de información, no se tiene la necesidad de suponer valores que no se pueden obtener.

3.4 TÉMEZ

El modelo de Témez pertenece al grupo de los denominados modelos agregados de simulación de cuencas. 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 regulado por leyes específicas de reparto y transferencia entre los distintos términos del balance, como se muestra en la figura 2 (Paredes, et al., 2014).

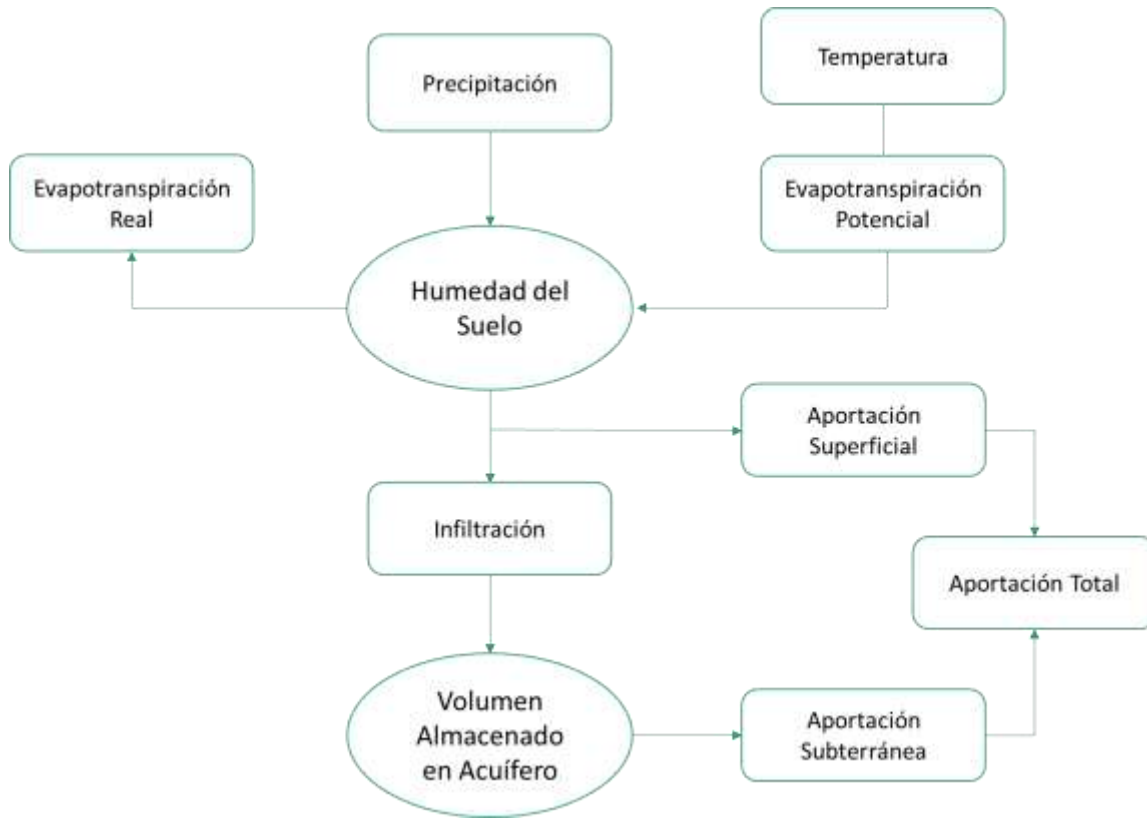


Figura 2. Modelo de Cálculo del modelo hidrológico del modelo Témez.

El modelo no considera la distribución espacial de las variables y parámetros con los cuales se realizan os cálculos, es por ello que deben ser sustituidas por un valor medio, que los valores tengan cierta homogeneidad climática, edafológica y geológica para la zona de estudio; de esta forma, es recomendable que las cuencas de gran tamaño que simulación que se tienen se subdividan en subcuencas o microcuencas, de tal manera que los valores en cada microcuenca cambien y se puedan tener los valores más acercados a la realidad de la distribución espacial de las características, así el modelo trabaja como semiagregado.

Cabe resaltar que el modelo supone a las cuencas como hortonianas esto quiere decir que no tiene aportación subterránea (manantial o río-acuífero), por lo que las únicas aportaciones con las que se cuenta son las superficiales.

El programa permite trabajar con cualquier periodo de tiempo y para la obtención de resultados se puede utilizar el intervalo que se desee; sin embargo, se acostumbra utilizar un intervalo mensual, ya que los datos con los que se cuenta se presentan de esta forma y esto, ayuda llegar a la calibración del modelo de una forma más simple.

El modelo considera el terreno dividido en 2 zonas:

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

El reparto de flujos salientes e intermedios y de los almacenamientos intermedios, dependen del flujo entrante de precipitación. Según la figura 3, se tiene como flujo de entrada tenemos la precipitación (P); los flujos de salida son: evapotranspiración real (E), aportación superficial (A_{sup}) y aportación Subterráneo (A_{sub}). La infiltración es el único tipo de flujo intermedio que tiene el modelo, que considera la cantidad de agua que pasa entre la parte superior del suelo a la zona inferior del acuífero, por lo que la infiltración se identifica con la recarga al acuífero; por último, tenemos que el almacenamiento intermedio corresponde a la humedad del suelo y al volumen almacenado en el acuífero.

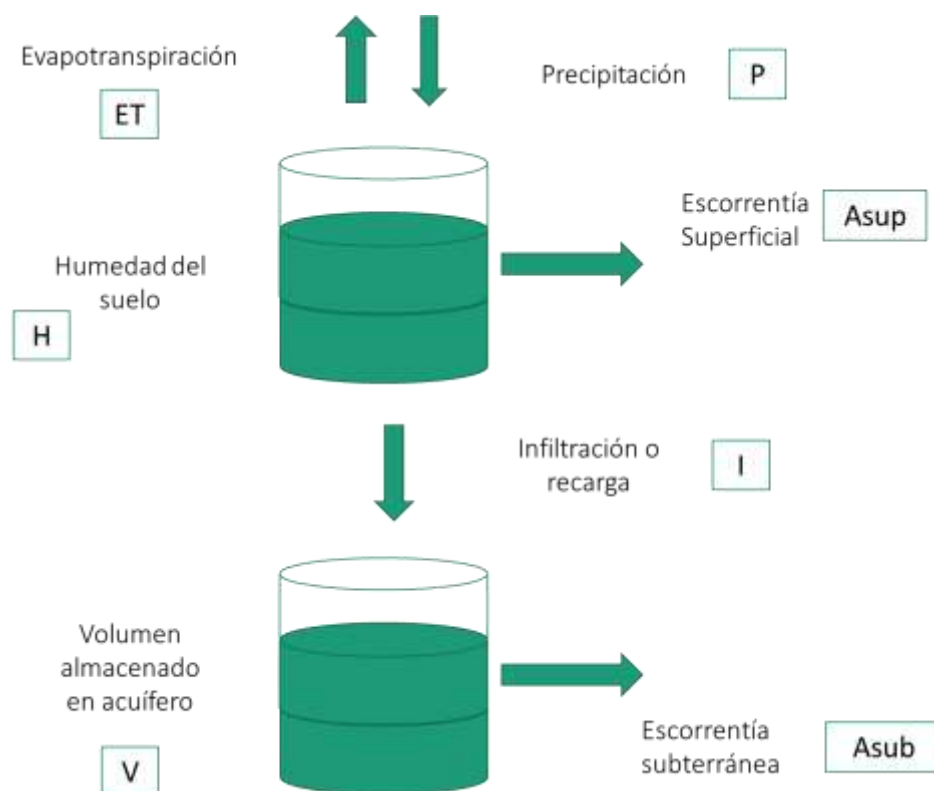


Figura 3. Esquema de flujos y almacenamiento del modelo de Tézmez.

En el modelo de Tézmez, el agua que procede de la precipitación se distribuye en tres formas diferentes:

- ⊕ El excedente (T), que a su vez se descompone en un flujo de infiltración al acuífero desde la zona superior del suelo (I_t), y el flujo que discurre superficialmente (A_{sup}). Parte del agua almacenada en la zona inferior o acuífero desagua en el intervalo de tiempo presente (A_{sub}) y la otra parte permanece como almacenamiento subterráneo.
- ⊕ La evapotranspiración real (E_t) de una parte o de toda la humedad almacenada en la zona superior del suelo (H_t).
- ⊕ La humedad del suelo (H_t) que se almacena en la zona superior del suelo, cuyo límite es la capacidad máxima del almacenamiento hídrico del (H_{max_t}).

3.4.1 PROCESO DE CÁLCULO

A continuación se desarrollan las ecuaciones de estado de modelo, ecuaciones que regulan los procesos de transferencia hídrica, y del resto del ciclo hidrológico.

CÁLCULO DEL EXCEDENTE TOTAL T_t

Se considera que una fracción de agua que se precipita sobre el terreno (P_t) es almacenada en la zona superior del suelo (H_t) y que el resto, que se conoce como excedente (T_t), como se muestra en la figura 4; éste se distribuye entre la aportación se origen superficial (A_{sup}) y la infiltración sobre el acuífero o recarga (R_t) (Paredes, et al., 2014).

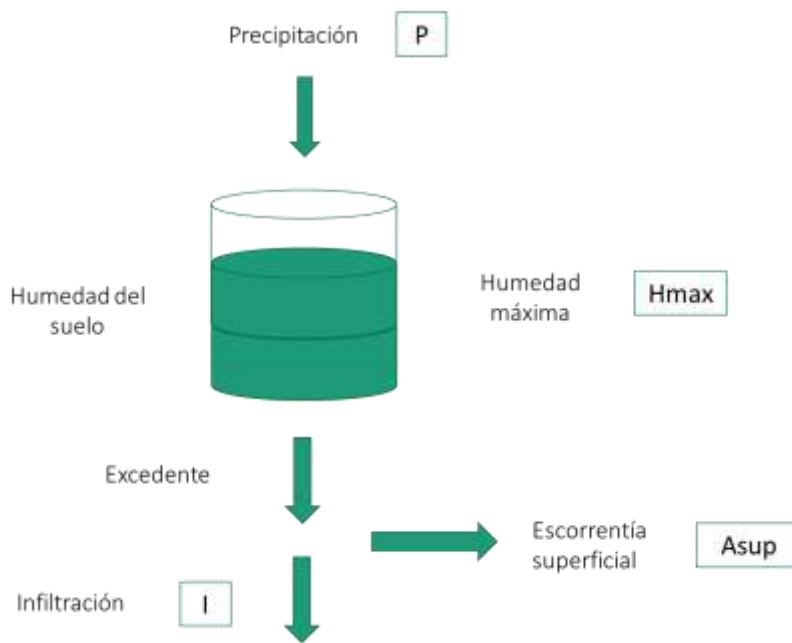


Figura 4. Transformación de precipitación en excedente.

Se tiene que el excedente (T_t) es 0, si $P_0 \geq P_t$, ya que toda el agua que se precipita se infiltra o se satura y, por tal motivo no queda volumen que se pueda escurrir.

$$T_t = \frac{(P_t - P_0)^2}{P_t - \delta_t - 2P_0} \quad \text{si } P_t > P_0$$

Donde:

$$\delta = H_{max} - H_{t-1} + ETP_t$$

$$P_0 = C(H_{max} - H_{i-1})$$

Siendo:

- Hmax la capacidad máxima de almacenamiento del suelo (mm), que depende de las características del suelo y la vegetación donde tiene lugar la evapotranspiración. El valor de Hmax aumenta conforme lo hacen aquellos factores que facilitan la retención de agua en el suelo y el espesor del mismo que puede ser drenado por evapotranspiración (Paredes, et al., 2014).
- H_{t-1} el almacenamiento de agua en el suelo (mm) en el instante t-1
- ETP_t la evapotranspiración potencial (mm) en el intervalo de tiempo t. Es la máxima evapotranspiración que se produciría en condiciones óptimas de humedad (Paredes, et al., 2014).
- C el coeficiente de inicio de excedente. Un factor adimensional, que define el inicio de la escorrentía antes de que se alcance el máximo de humedad en el suelo Hmax (Paredes, et al., 2014).

CÁLCULO DE ALMACENAMIENTO SUPERFICIAL E INFILTRACIÓN

Una vez estimado el excedente (T_t), la humedad en el suelo al final de cada mes se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$H_t = \max \left\{ H_{t-1} + P_t - T_t - ETP_t, 0 \right\}$$

La ecuación anterior representa el cierre del balance entre el agua que queda en el suelo y la ETP. Si el resultado es negativo la humedad del suelo al final del periodo es nula, y la evapotranspiración potencial no se habrá desarrollado en su totalidad.

La evapotranspiración real que se produce (ET_t) se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$ET_t = \min \left\{ \begin{array}{l} H_{t-1} + P_i - T_i \\ ETP_t \end{array} \right\}$$

Siempre que exista suficiente agua en el suelo, la evapotranspiración se desarrolla hasta alcanzar la evapotranspiración potencia. En caso de haberla, la humedad en el suelo al final del mes será nula (Paredes, et al., 2014).

La infiltración del acuífero es función del excedente y de la infiltración máxima (I_{max}), que expresa la máxima cantidad de agua que puede infiltrarse en el terreno, a través de la siguiente expresión empírica:

$$I_t = I_{max} \cdot \frac{T_t}{T_c + I_{max}}$$

A medida que el excedente aumenta, también lo hace la infiltración y ésta tiende a la infiltración máxima (I_{max}); por otra parte la infiltración máxima no depende exclusivamente de las propiedades del terreno, sino de la intensidad y concentración de las precipitaciones.

CÁLCULO DE LA APORTACIÓN SUPERFICIAL

La parte del excedente que no infiltra al acuífero se convierte en escorrentía superficial (Paredes, et al., 2014), por lo que tenemos la siguiente expresión

$$Asup_t = T_t - I_t$$

CÁLCULO DE LA APORTACIÓN SUBTERRÁNEA

La aportación subterránea producida (A_{sub_t}), representada en la figura 5, está formada por el drenaje del agua almacenada en el acuífero (V_t) por encima del umbral de salida de la red fluvial.

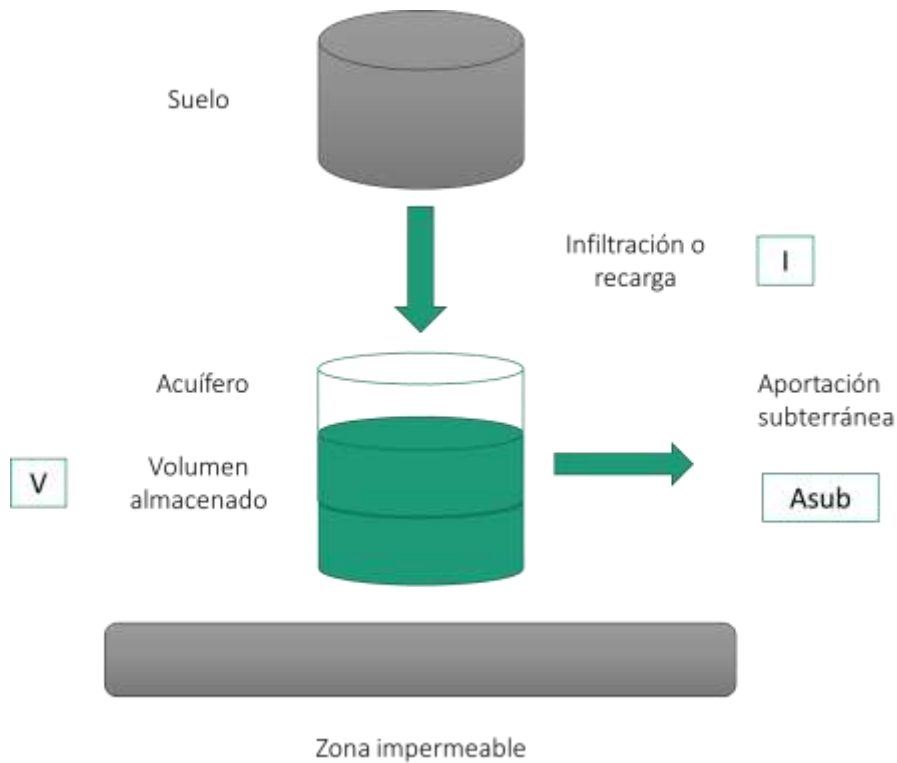


Figura 5. Producción de escorrentía subterránea.

Para simular el comportamiento del acuífero se plantea el modelo unicelular, el cual está basado en la función exponencial que representa la curva de agotamiento de un manantial. La variable de estado es el volumen almacenado en el acuífero (V_t).

El caudal cedido a la red superficial (Q_t) se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Q_t = \alpha \cdot V_t$$

Donde:

- α es una constante con dimensiones de $[T^{-1}]$

Si se aplica al acuífero una ecuación de balance de masa de tipo representado por la ecuación de balance de masas del tipo representado por la ecuación diferencial ordinaria siguiente:

$$I_t - Q_t = \frac{dV_t}{dt}$$

Donde:

- I_t son las entradas al acuífero en el tiempo t , o sea, las recargas que se introducen al acuífero.
- Q_t son las salidas del acuífero en el tiempo t , o sea, las extracciones.
- V_t es el volumen almacenado en el acuífero en el tiempo t .

Sustituyendo la primera ecuación en la segunda y considerando R_t como el caudal de recarga neta al acuífero en el tiempo, por lo que se tiene:

$$R_t - \alpha \cdot V_t = \frac{dV_t}{dt}$$

La resolución de esta ecuación diferencial condice, para la condicional inicial de volumen inicial de acuífero, V_0 y para un caudal de recarga constante R , a:

$$V_t = V_0 e^{-\alpha \cdot t} + \frac{R}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \cdot t})$$

Expresando el volumen como una función del caudal y haciendo $R=0$, se obtiene una expresión que representa la curva de agotamiento del acuífero:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t}$$

La recarga R , se puede expresar también como:

$$R = S \cdot I_t$$

Siendo:

- S la superficie del acuífero (km^2)
- I_t la cantidad de agua infiltrada en el acuífero.

De esta forma, la ecuación que determina el volumen en el acuífero en el mes, por lo que la expresión queda como:

$$V_t = V_{t-1}e^{-\alpha \cdot \Delta t} + \frac{S \cdot I_t}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \cdot \Delta t})$$

Este modelo subterráneo presenta la ventaja de la simplicidad de cálculo, pero la desventaja de que supone una simplificación excesiva del sistema, por lo que no es válido para modelar acuíferos cársticos, donde se han identificado más de una rama de descarga en el agotamiento del acuífero (Paredes, et al., 2014).

3.4.2 PARÁMETROS

El modelo de Témez, contempla el ajuste de cuatro parámetros: Hmax, C, lmax y α ; los parámetros Hmax y C regulan el almacenamiento de agua en el suelo, lmax separa la escorrentía superficial de la subterránea y el parámetro α regula el drenaje subterráneo.

También deben definirse las condiciones iniciales de simulación, como es humedad inicial de suelo (H_0) y del almacenamiento inicial en el acuífero (que puede aproximarse a $V_0=Q_0/\alpha$). El efecto de los valores iniciales se reduce a medida que transcurre el tiempo, por lo que en realidad estos valores son poco significativos.

La tabla 5 muestra un resumen de los parámetros del modelo y los rangos orientativos en los que pueden oscilar; aunque los parámetros suelen encontrarse entre este rango de valores, es importante recalcar que no deben ser considerados como límites a la hora de calibración.

Tabla 5. Rango de valores en los parámetros del modelo de Témez.

	Hmax (mm)	C	lmax (mm)	Alfa (mes ⁻¹)
Mínimo	50	0.2	10.00	0.00
Máximo	250	1	150.00	0.90

Las tablas 6 y 7 muestran una aproximación de los parámetros Hmax e lmax, en función de los usos del suelo y del tipo de suelo.

Tabla 6. Valor del parámetro de humedad máxima en función del uso de suelo.

Uso del suelo	Hmax (mm)
Superficies artificiales	40
Espacios con poca vegetación	100
Tierras de labor seco	150
Tierras de labor en regadío	215
Praderas y pastizales naturales	150
Sistemas agrícolas heterogéneos	195
Cultivos permanentes	210
Vegetación arustiva	135
Bosque mixto	220
Bosque de frondosas y coníferas	230
Zonas húmedas, superficies de agua y artificiales	300

Tabla 7. Valor del parámetro de infiltración máxima en función del tipo de suelo.

Litología	lmax (mm)
Material aluvial de origen indeferenciado	400
Calizas y dolomías	1000
Margas	85
Margas y esíferas	75
Yesos	64
Materiales arenosos	450
Materiales gravo - arenosos	500
Calcarenitas (Macigno)	250
Arcosas	150
Rañas	95
Granitos	65
Rocas metamórficas	20
Gneiss	55
Pizarras	40
Rocas volcánicas	275

3.5 INTERFAZ DEL SOFTWARE

El software EvalHid tiene una interfaz bastante amigable, por lo que los pasos son simples y concretos; éste software es de uso libre y su descarga puede realizarse en el sitio web de la Universidad Politécnica de Valencia. (UPV, 2017)

Para poder realizar el proyecto, se requieren archivos en formatos específicos, que son los siguientes:

- ⊕ Serie de precipitación (archivo INP)
- ⊕ Serie de temperatura (archivo INP)

- ⊕ Serie de evapotranspiración (archivo INP)
- ⊕ Punto de desagüe de la cuenca (archivo Shape, en georreferenciado en coordenadas UTM)
- ⊕ Cuenca (en formato Shape, con el área de la cuenca en km² y georreferenciado en coordenadas UTM).

Los archivos INP se clasifican como archivos de datos, ya que son los archivos de entrada que se utilizan para realizar simulaciones y análisis a través del software; se utilizan sobre todo para guardar los datos de entrada de trabajo que permite la producción de visualizaciones de salida así como otros tipos de información (ReviverSoft, 2017).

Todos los archivos que se tienen deben de encontrarse en una carpeta de “directorio de trabajo” localizada como subcarpeta de la ruta de la ubicación del proyecto. Una vez que se tienen los archivos necesarios, podemos empezar a utilizar el software EvalHid.

Se abre el software, con lo cual aparecerá la ventana principal del programa como se ve en la figura 6, después tal como se observa en la figura 7, se selecciona la pestaña archivo y se hace click en la opción Nuevo Proyecto.



Figura 6. Ventana Principal del programa Evalhid.

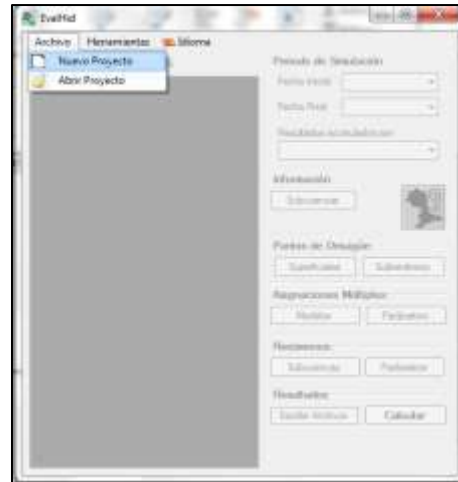


Figura 7. Pestaña para crear un Nuevo Proyecto.

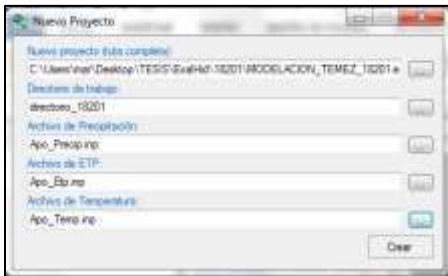


Figura 8. Ventana Nuevo Proyecto.

En esta ventana (figura 8), debe ingresarse la ruta completa donde se guardará el proyecto, así como la carpeta de “directorio de trabajo” donde se encuentran las series de precipitación, evapotranspiración y temperatura. En las series, se puede omitir la que pertenece a la evapotranspiración, ya que ésta es calculada por el mismo software con el método de Thornthwaite. Para culminar, se da click en el botón crear.

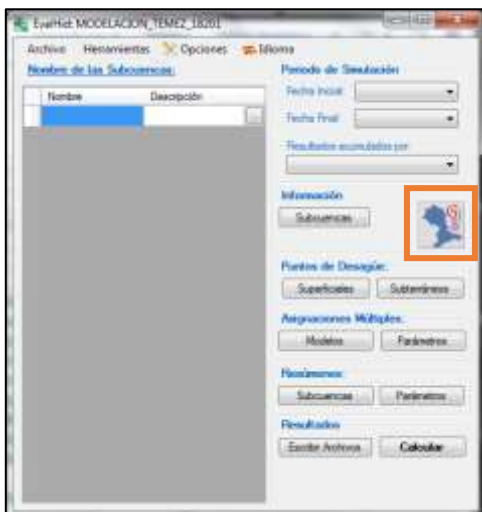


Figura 9. Localización del botón GIS.

Una vez que se ingresa el directorio de trabajo, se da click en el botón GIS (figura 9), para que el software despliegue una nueva ventana.



Figura 10. Ventana GIS; agregar un shape.

Para agregar las cuenca y el punto de salida se hace click en el botón “+” como se observa en la figura 10, para que despliegue una ventana donde se pone la ruta de los archivos.

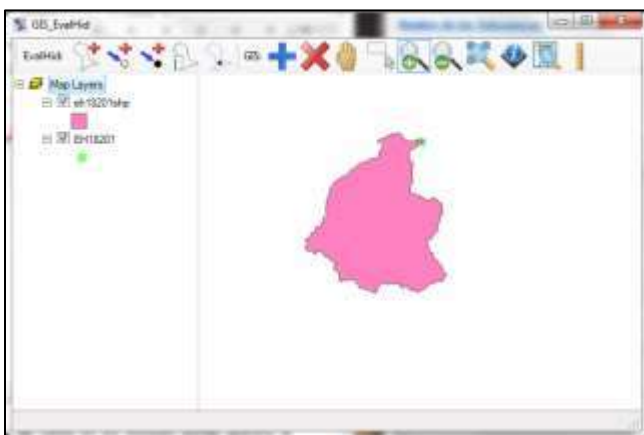


Figura 11. Ventana GIS; cuenca y punto de salida agregados.

Una vez que se ha agregado la ruta de archivos, el apartado GIS del software se verá de la siguiente manera, como se observa en la figura 11.

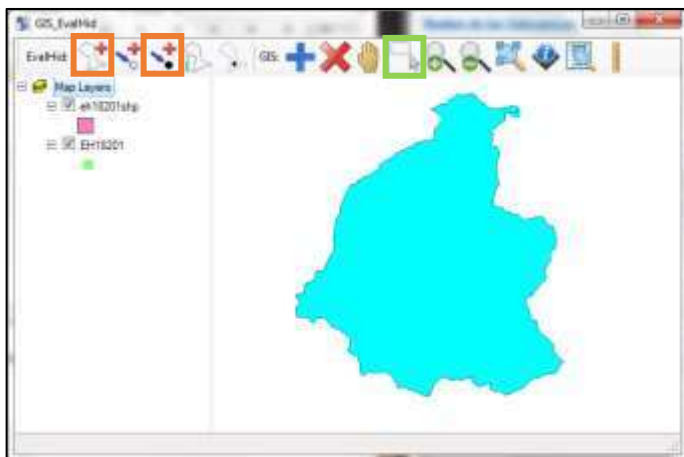


Figura 12. Ventana GIS, ubicación de botones para agregar la cuenca y el punto de salida al modelo.

Luego, se seleccionan para que se vean como en la figura 12, acto seguido, se da click en los botones que están marcados con un recuadro naranja para poder agregarlos al modelo, con la información que se proporciona en las figuras 13 y 14, y se inserta la información que proviene del shape.

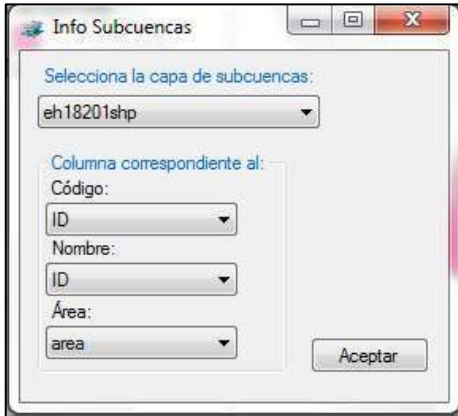


Figura 13. Ventana que contiene la información de la subcuenca.

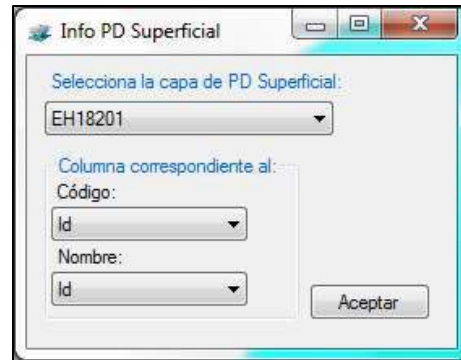


Figura 14. Ventana que contiene la información del punto de salida.

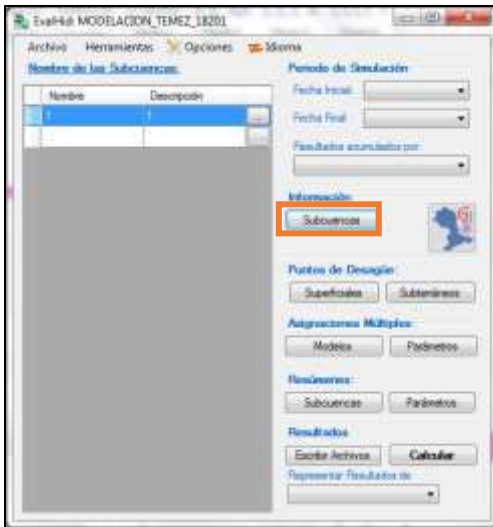


Figura 15. Ubicación del botón subcuencas en el apartado información.

Una vez que se tienen ingresados los shapes, debe regresarse a la ventana principal del programa, donde se hace click en el apartado de subcuencas (información), que es el botón que se encuentra marcado con un recuadro naranja en la figura 15.

En el apartado general de información de la subcuenca (figura 16), se modifican las series de precipitación, temperatura y evapotranspiración que corresponde a cada cuenca ingresada, así como

el tipo de modelo que se trabajará (recordando que además de Témez también existe HBV y Sacramento) y el punto de desagüe superficial o subterráneo que se tiene. Ahí mismo se puede verificar el área de la cuenca y en caso de tener un modelo de nieve se podrá modificar de la misma forma.



Figura 16. Ventana para editar la información de las subcuencas, pestaña general.



Figura 17. Ventana para editar la información de las subcuencas, pestaña parámetros de Témez.

El apartado parámetros de Témez (figura 17) aparece una vez que se selecciona el tipo de modelo; en este caso en particular, en esa sub-ventana se hace click en valores por defecto, donde el mismo software modificará los valores iniciales de Hmax, Imax, C y alfa como los predeterminados.

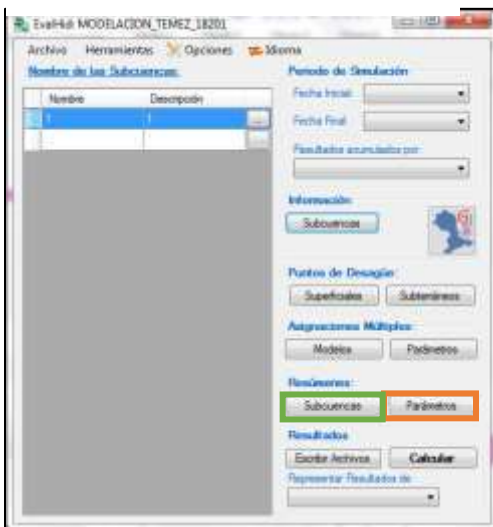


Figura 18. Ubicación de los botones subcuencas y parámetro.

Para asegurar que los datos han sido ingresados correctamente, basta con ir al apartado de resúmenes, en donde se seleccionan las dos opciones: subcuencas y parámetros, que son los recuadros verde y naranja respectivamente de la figura 18; las cuales abren ventanas correspondientes a las figuras 19 y 20, en las que se puede ver en concreto todos los datos y parámetros que se ha agregado hasta el momento.

Nombre de la Subcuenca	Descripción	Columna de Precipitación	Columna de ETP	Columna de Temperatura	Superficie	Parciales	Ajuste Precipitación	Ajuste ETP	Modelo Escorrentía	Modelo Nieve	PD Superficial	PD Subterráneo	Ajuste Temperatura
1		18452	18452	18452	425.33937...	No	1	1	Témez	Ninguno	0	Ninguno	1

Figura 19. Tabla de resumen de la información de las subcuencas.

Nombre de la Subcuenca	Hmax	C	Imax	Alfa	H	W
1	150	0.3	230	0.23	20	25

Figura 20. Tabla de resumen de los parámetros.

Una vez verificados los parámetros y la información del modelo, se deben especificar las fechas para las cuales se realizará la modelación, que dependen directamente de los datos con los que se cuenta para la calibración y la periodicidad con los que los datos se registran, generalmente se utiliza la escala mensual; se modifican las fechas iniciales y finales, así como la pestaña de resultados acumulados que corresponden a los recuadros naranja y al recuadro verde de la figura 21.



Figura 21. Edición del periodo de simulación para la modelación.

Ahora bien, podemos iniciar a correr el software, por lo que nos situamos en la parte de resultados; primero se escriben los archivos y después se calculan, que son los recuadros verdes correspondientes a la figura 22; con lo que se tiene la primer corrida, por medio de la cual el software informa si existe algún problema o si no se llegase a tener la suficiente información.

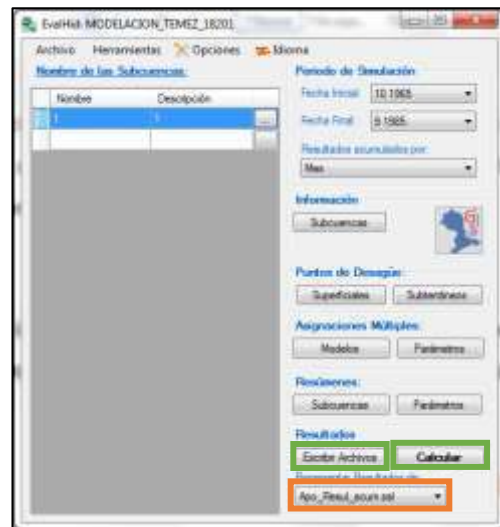


Figura 22. Botones para poder realizar la modelación.

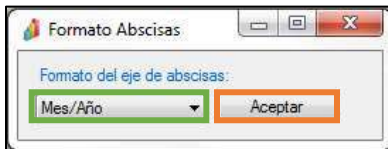


Figura 23. Ventana del eje de abscisas; para obtener la gráfica de resultados.

Una vez que se tiene la primer corrida, se hace click en el apartado de representar resultados (recuadro verde de la figura 22) donde se selecciona la opción “Apo_Resul_acum.sal”; a continuación se despliega la ventana de la figura 23 en la cual seleccionaremos la opción “Mes/Año” para el formato del eje de las abscisas y se acepta.

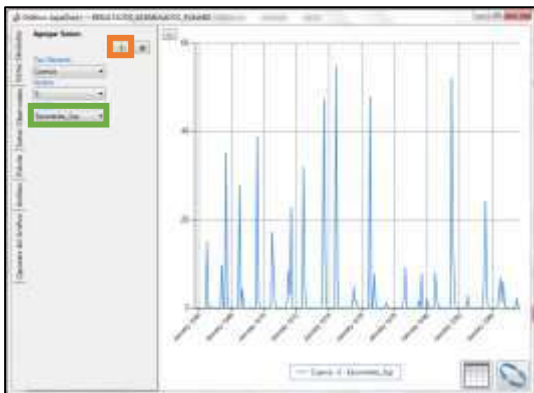


Figura 24. Ventana para la representación gráfica de los resultados en EvalHid.

A su vez, se abrirá una nueva ventana, como la de la figura 24, donde se pueden graficar las series ingresadas y los resultados obtenidos como: precipitación líquida, aportación, escorrentía superficial y subterránea, evapotranspiración e infiltración. En este caso la variable a graficar será la escorrentía superficial, por lo que se selecciona (recuadro verde), y después se da click en el botón “+”, con lo que se obtendrá una gráfica donde se aprecia el escurrimiento en un periodo de tiempo.

El procedimiento para obtener la simulación es bastante sencillo. La complejidad de la simulación superficial radica en encontrar parámetros que simulen correctamente el comportamiento del escurrimiento en la cuenca. Es por ello que al terminar la simulación en el software, es necesario que los resultados se trasladen a un calibrador, el cual ayudará a encontrar valores óptimos para que la serie de datos simulados se asemeje a los datos observados para el mismo periodo de tiempo.

3.6 ANÁLISIS Y SENSIBILIDAD DEL MODELO

Los resultados del modelo son tan fiables como lo sean las suposiciones tomadas, los datos de entrada disponibles y los parámetros estimados. Es por ello que es tan importante encontrar los valores de los parámetros, tales que representen el comportamiento de la cuenca. Al proceso de obtención de estos parámetros se le denomina calibración y en el caso de los modelos precipitación-escorrentía se realiza mediante la aplicación de técnicas de optimización, las cuales buscan el conjunto óptimo de parámetros que hagan que los resultados del modelo se ajusten lo mejor posible a los valores observados; éste proceso se puede llevar a cabo de manera manual o mediante una calibración automática (Casas y Paredes, 2013).

3.6.1 CALIBRACIÓN MANUAL

En la calibración manual se realiza un proceso iterativo de prueba-error y cada vez que los parámetros del modelo son ajustados, se compara visualmente los resultados del modelo con los datos observados en las estaciones hidrométricas. La principal debilidad de esta forma de calibrar es la ausencia de medidas objetivas de comparación que hace difícil saber cuándo se ha alcanzado el mejor ajuste posible y, por lo tanto, cuando dar por terminado el proceso de calibración. Es por ello que, para una misma cuenca, se pueden tener diferentes combinaciones de parámetros.

3.6.2 CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA

La calibración automática o autocalibración permite agilizar el proceso de calibración y proporcionar una mayor objetividad y fiabilidad a los resultados alcanzados en dicho proceso. Es importante entender que los métodos de calibración automáticos no han madurado lo suficiente como para reemplazar por completo a los métodos de calibración manual y, aunque son mucho más rápidos proporcionando soluciones, se acostumbra emplearlos de forma conjunta con los métodos manuales.

3.6.3 HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN

El algoritmo evolutivo de calibración Shuffled Complex Evolution Method, desarrollado por la Universidad de Arizona (SCE-UA), es un potente procedimiento de optimización global capaz de localizar de forma consistente el óptimo global de un modelo lluvia-escurrimiento (Duan, et al., 1992).

El calibrador SCE-UA ha sido utilizado con éxito para la resolución de problemas no lineales en numerosas aplicaciones en el ámbito de la calibración de modelos hidrológicos de cuenca (Casas y Paredes, 2013).

El funcionamiento básico del algoritmo SCE-UA está inspirado en los principios de la selección natural y la genética y es una combinación de procedimientos deterministas y aleatorios y parte de diferentes puntos de búsqueda que se organizan por equipos (complex); de esta manera, la búsqueda de la solución global óptima se plantea como un

proceso evolutivo (evolution) basado en la reproducción, donde, además se mezclan (shuffle) equipos (Casas y Paredes, 2013).

3.6.3.1 INTERFAZ DEL CALIBRADOR SCE-UA

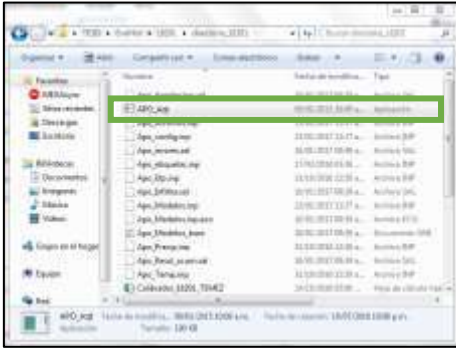


Figura 25. Ubicación de la aplicación en la carpeta de trabajo.

Para que el calibrador pueda ser ejecutado, debe encontrarse en la carpeta donde se escriben los archivos, incluyéndose la aplicación APO_Aqt , tal como se señala en la figura 25, que se descarga del sitio oficial AQUATOOL de la UPV. (UPV, 2017)

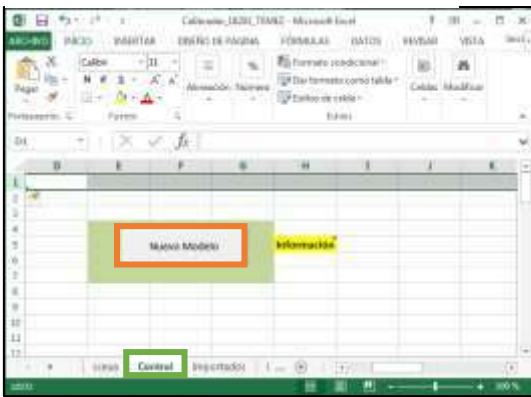


Figura 26. Ubicación del botón Nuevo Modelo.

El calibrador SCE-UA funciona como un archivo con una extensión tipo XLS; así que una vez realizada la ejecución en el software EvalHid, se ingresa al calibrador, donde en la pestaña control se selecciona el botón de Nuevo Modelo (señalado con un recuadro verde y naranja respectivamente como se muestra en la figura 26), con el cual el archivo extrae los datos generados del software.

Una vez que se tienen los resultados de Evalhid cargados en el archivo excel, se debe continuar en la misma pestaña de control, donde se concatenan (vinculan) los valores óptimos que nos va arrojando el programa mismo (figura 27), de tal manera que cuando el calibrador

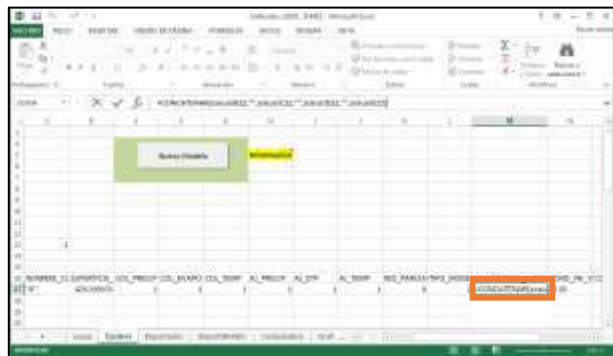


Figura 27. Concatenación de los parámetros óptimos.

comience a funcionar, éste vaya recalculando con los valores que se van proponiendo como óptimos en la hoja “scea”, para de esta forma comenzar con la sensibilización del modelo.

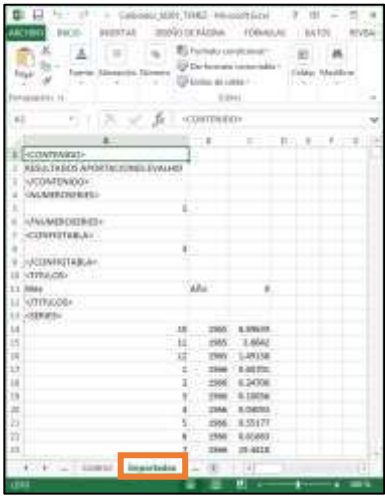


Figura 28. Ubicación de las series de resultados provenientes de EvalHid.

Es imperativo que al momento que sean vinculados parámetros óptimos se asegure que los valores que se tienen en la hoja de “importados”, que se señala en la figura 28, sean realmente los que se han calculado. Básicamente se debe situar dicha hoja y revisar que el periodo de años simulados es el que se necesita, ya que éstos son los que se enlazarán con la hoja “comparativa”.

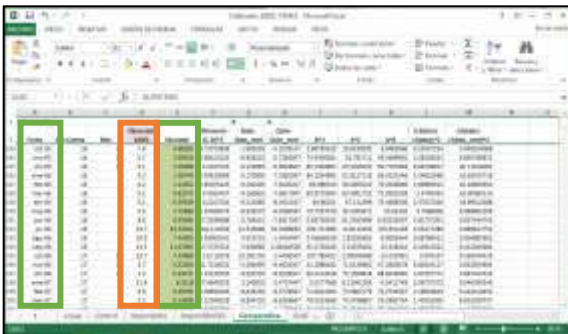


Figura 29. Ubicación de las series observados y simulados.

Se tiene que ir a la pestaña de “comparativa” para enlazar los valores obtenidos por medio del software y revisar el periodo de simulación, como se observa en la figura 29; ahora se deben ingresar los datos observados en la estación hidrométrica ya que las fórmulas no necesitan ser modificadas.

Dentro de la misma pestaña, se encuentran los indicadores de ajuste, por medio de los cuales se pueden encontrar los valores óptimos según las necesidades, éstos se presentan como F1 (Nash-Sutcliffe), F2 (Nash-Sutcliffe Modificado), F3 (Pearson) y F4 (simetría de ajuste).

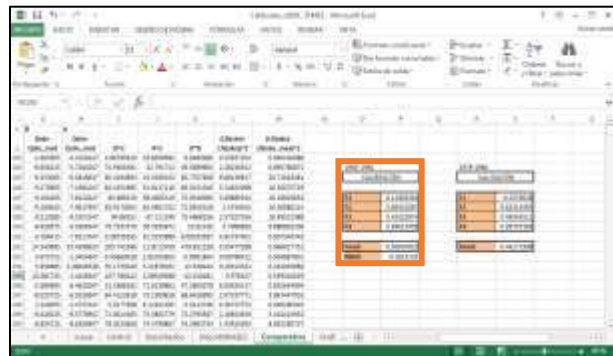


Figura 30. Ubicación de los indicadores de ajuste.

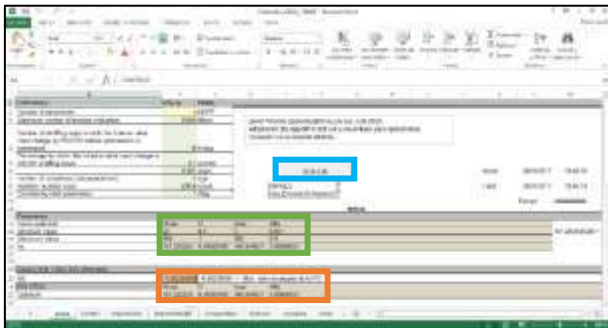


Figura 31. Ubicación del botón para iniciar la simulación, así como los parámetros óptimos.

Ahora bien, ya que todo lo anterior ha sido modificado y revisado, se debe situar en la pestaña sceua, donde el orden de la secuencia de cálculo inicia con la asignación límite de los parámetros H_{max} , C , I_{max} y Alfa , así como el valor inicial (X_0) para las iteraciones, que se encuentran marcadas en la figura 31 con

un recuadro verde. Una vez que se tienen los parámetros asignados, se hace click en el botón SCE-UA (marcado con un recuadro azul), con el cual el calibrador comienza a funcionar, el cual envía ésta asignación de parámetros al software, con el cual realizará una corrida para cada iteración que se realice.

Una vez que se tiene una función objetivo fija, o sea, que el calibrador haya terminado de trabajar, se revisan los valores óptimos que el mismo calibrador sugiere, de esta forma, se pueden copiar dichos valores como los nuevos valores iniciales (X_0), esta operación es un ciclo subsecuente hasta igualar su magnitud, como se igualan en la figura 32, marcado con un recuadro naranja.

La calibración termina una vez que la función objetivo cumpla con el rango de aceptación según el indicador de ajuste que se esté utilizado.

3.6.4 INDICADORES DE AJUSTE

Los indicadores de ajuste son funciones objetivo que constituyen uno de los elementos principales en los procedimientos de estimación automática de parámetros; es una ecuación que se emplea para obtener una medida numérica de la diferencia entre la respuesta simulada por el modelo (Q_{sim}) y la respuesta observada (Q_{obs}) en las estaciones de aforo. El propósito de la calibración automática de modelos es por tanto, encontrar aquellos valores de los parámetros del modelo que optimicen el valor numérico del indicador de ajuste.

EFICIENCIA DE NASH-SUTCLIFFE (NSE)

La eficiencia de Nash-Sutcliffe es un error cuadrático medio que da mayor peso a los errores grandes, que a menudo pero no siempre, suceden durante periodos de flujo elevado. El valor de NS varía de -1 a 1; donde un valor NS=1 significa un ajuste perfecto y un valor NS=0 significa que el error es del mismo orden de magnitud de varianza de los datos observados, por lo que la media de los datos observados tendría una capacidad de predicción similar al modelo; por otra parte, los valores menores a cero implican que la media tiene una capacidad de predicción más alta que el modelo, lo que implica el mal funcionamiento del modelo (Casas y Paredes, 2013).

La principal desventaja del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe es que las diferencias entre valores observados y simulados se calculan como valores cuadráticos. Como resultado, los valores mayores de las series temporales están fuertemente sobrevalorados mientras que los valores bajos no son tomados en cuenta. En la cuantificación de predicciones de flujo, esto conlleva a una sobreestimación del funcionamiento del modelo durante picos de flujo y una subestimación del funcionamiento de modelos para condiciones de flujo escaso. El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe no es muy sensible a sobrevaloraciones o infravaloraciones sistemáticas del modelo, especialmente durante periodos de flujo escaso (Casas y Paredes, 2013) y es representado por la siguiente ecuación:

$$F_1 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}(t)]^2}$$

Los rangos de calidad de ajuste de la eficiencia Nash- Sutcliffe se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Calidad de ajuste del coeficiente Nash-Sutcliffe.

Calidad de Ajuste	NSE
Muy Buena	0.75 < NSE ≤ 1.00
Buena	0.65 < NSE ≤ 0.75
Satisfactoria	0.50 < NSE ≤ 0.65
No Satisfactoria	NSE ≤ 0.50

EFICIENCIA DE NASH-SUTCLIFFE MODIFICADO (*ln* NSE)

La eficiencia de Nash-Sutcliffe modificado es la transformación logarítmica del flujo, que da mayor peso a los errores durante flujos escasos. Para reducir el problema de las diferencias cuadráticas y la consecuente sensibilidad a los valores extremos; éste coeficiente se calcula con valores logarítmicos de los valores observados (Q_{obs}) y simulados (Q_{sim}). Mediante esta transformación logarítmica del flujo, los picos se achata y los valores más bajos se mantienen más o menos al mismo nivel. Como consecuencia, la influencia de los valores de flujo escaso se incrementa en comparación con los picos de flujo y por tanto aumenta la sensibilidad del *ln* NSE a las sobrevaloraciones o infravaloraciones sistemáticas del modelo (Casas y Paredes, 2013), la ecuación que rige este indicador de ajuste es la siguiente:

$$F_2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [\ln(Q_{sim}(t)) - \ln(Q_{obs}(t))]^2}{\sum_{t=1}^n [\ln(Q_{obs}(t)) - \ln(\bar{Q}_{obs}(t))]^2}$$

La calidad de ajuste para el indicador Nas-Sutcliffe modificado, se muestra en la tabla 9, donde se observa que debe ser mayor a 0.5 para que cumple.

Tabla 9. Calidad de ajuste del coeficiente Nash-Sutcliffe modificado.

Calidad de Ajuste	<i>ln</i> NSE
Muy Buena	0.75 < NSE ≤ 1.00
Buena	0.65 < NSE ≤ 0.75
Satisfactoria	0.50 < NSE ≤ 0.65
No Satisfactoria	NSE ≤ 0.50

COEFICIENTE DE CORRELACIÓN PEARSON

El coeficiente Pearson mide la covariabilidad de valores observados (Q_{obs}) y simulados (Q_{sim}) sin penalización por sesgo. El valor del coeficiente varía de -1 a 1. El coeficiente toma el valor de 1 cuando los puntos de datos describen una línea perfectamente recta con pendiente positiva, y, se denomina correlación completa positiva; por otra parte, si los puntos de datos describen una perfecta línea recta con pendiente negativa, el coeficiente toma el valor de -1, donde se denomina como una correlación

completa negativa. Un valor de correlación cercano a cero indica que las variables no están correlacionadas linealmente (Casas y Paredes, 2013).

El coeficiente de Pearson tiene el inconveniente que es un estadístico pobre para decidir si la correlación observada es estadísticamente significativa y/o una correlación observada es significativamente más fuerte que otra (Casas y Paredes, 2013); dicho coeficiente se representa de la siguiente manera:

$$F_3 = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim}) \cdot (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n ((Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim})^2 \cdot \sum_{t=1}^n (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2)}$$

En la tabla 10 se muestran los rangos en los que se define la calidad de ajuste de correlación de Pearson.

Tabla 10. Calidad de ajuste del coeficiente de correlación de Pearson.

Calidad de Ajuste	r^2
Muy Buena	$0.90 < r^2 \leq 1.00$
Buena	$0.75 < r^2 \leq 0.90$
Satisfactoria	$0.50 < r^2 \leq 0.75$
No Satisfactoria	$r^2 \leq 0.50$

4 SIMULACIÓN SUBTERRÁNEA

4.1 AQUATOOL

La dificultad para el análisis del uso conjunto de aguas superficiales y aguas subterráneas se debe principalmente a la complejidad de los modelos matemáticos que simulan ambos tipos de recursos, así como por la integración e interacción de los mismos y el uso de las herramientas para proporcionar los datos necesarios para dotar al modelo de los elementos requeridos para procesar la simulación (Pérez, 2013).

Para estudiar las distintas alternativas de utilización de un acuífero, es necesario simular el modelo para cada una de ellas en las que varíen las acciones exteriores. En algunos casos, es posible la utilización de la teoría de los sistemas lineales, en los que se puede aplicar los principios de proporcionalidad y superposición. Sin embargo, y aún bajo estas condiciones, la utilización de un sistema distribuido en el que intervengan un número elevado de acciones, con un gran número de puntos, en diferentes momentos de tiempo es aún reducida debido a la necesidad de importante memoria y tiempo en el procesamiento (Pérez, 2013).

Aquatool es un sistema formado por diversas unidades de control como son: SIMWIN, OPTIWIN y AQUIVAL, desarrollado en el departamento de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Valencia. (Dölling, 2001)

El modelo fue diseñado para el manejo operacional y como plataforma de planeación para la toma de decisiones en sistemas complejos de cuenca con múltiples embalses, acuíferos y centros de demanda; el software se encuentra implementado dentro de Microsoft Windows, Aquatool fue codificado con diferentes lenguajes de programación como son C++, Visual Basic y FORTRAN (Sechi y Sulis, 2010).

El software es actualizado y expandido constantemente, por lo que actualmente se construye a partir de varios módulos, dentro de los que se encuentran el módulo de simulación (SimWin); un módulo de manejo de sistemas de recurso hídrico, el cual

considera el riesgo de sequía (SInRisk), que funciona con base a SimWin; un módulo de optimización con transcurso mensual (OptiWin) que es menos detallado que SimWin; y, un módulo de simulación de agua subterránea y su distribución por medio del método de Autovalores (Aquival) (Sechi y Sulis, 2010).

4.2 AQUIVAL

Aquival es una interfaz que pertenece al paquete informático Aquatool (codificado en C++); fue desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia y permite la modelización de acuíferos previamente calibrados, mediante elementos finitos o diferencias finitas (Pérez, 2013).

Para el “modulo subterráneo” se determina el funcionamiento del acuífero con el que más está relacionada la subcuenca. Ambos módulos están sometidos a acciones internas y externas referentes al suministro y demanda de agua. Las acciones internas consideradas como procesos naturales son precipitación, evapotranspiración, escurrimiento e infiltración; las acciones externas consideran las demandas de agua (producto de las actividades desarrolladas por la población en la subcuenca) como su principal componente (Hernández, et al., 2014).

Es posible ir más allá del conocimiento de la situación del manejo actual del agua a través de la elaboración de escenarios tendenciales a mediano y largo plazos, mediante proyecciones de crecimiento poblacional, de incremento en las demandas o recarga en el sistema. Para ello se utiliza el software Aquatool con el que se hacen simulaciones alternas del conjunto del agua en una cuenca (Hernández, et al., 2014).

El módulo Aquival se usa para simular la evolución de los niveles piezométricos; atendiendo a distintos escenarios de gestión. Tanto el módulo Simges, como Aquival requieren datos generales de demandas de agua a una escala tiempo mensual (Hernández, et al., 2014), las cuales se determinan con ayuda de la base de datos del REPGA y los resultados de EvalHid.

Aquival requiere la discretización del acuífero, definiendo las dimensiones de las celdas, condiciones de contorno y propiedades de transmisividad o conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento para cada celda; basándose en información de estudios hidrológicos previos en el acuífero se pueden obtener dichos elementos.

Como mencionan Hernández, Solera, Nowak y Andreu (2014), el modelo considera parámetros hidrodinámicos medios, en base a estudios bibliográficos sobre la estratigrafía de la zona, siendo éstos conductividad y coeficiente de almacenamiento. Para obtener los primeros parámetros con los que se realiza la simulación, es necesario definir zonas de parámetros similares.

Esta modelización es llevada a cabo mediante el método de los Autovalores, el cual se aplica a acuíferos lineales (confinados) y da la solución de forma explícita y continua en el tiempo.

El modelo Aquival utiliza el método de Autovalores para producir un modelo distribuido de acuíferos con comportamiento lineal. Pérez y Senet (2015) explican que este método es particularmente apropiado para la integración de un sistema de gestión de recursos hídricos debido a su bajo requerimiento de esfuerzo computacional.

La aplicación del método de Autovalores es posible cuando los acuíferos son considerado como confinado completamente saturado, o bien como acuíferos no confinados donde las caídas en las disminuciones de los valores piezométricos son despreciables con respecto al espesor saturado.

Bajo estas condiciones, la ecuación que describe la variación del flujo en un intervalo de tiempo, puede ser expresada de acuerdo a la siguiente expresión matricial.

$$T \cdot H + Q = SF \cdot \Delta H \cdot \Delta t - 1$$

donde:

- T es la matriz que depende de la transmisividad, los contornos y el espacio de discretización ($m^2/\text{día}$).
- H es el vector de niveles piezométricos (m).
- Q es el vector de flujos externos ($m^3/\text{día}$).
- SF es la matriz diagonal que depende de la discretización y del coeficiente de almacenamiento en cada celda (m^2).

Cabe destacar que si las matrices T y SF son independientes de H y constantes en el tiempo; la ecuación anterior es lineal, y por ello, aplicable el principio de superposición. Esta condición se cumple en acuíferos confinados siempre que permanezcan completamente saturados y en acuíferos libres en los cuales los descensos piezométricos son despreciables respecto al espesor saturado.

4.2.1 PLATAFORMA DEL SOFTWARE

El método de los Autovalores da lugar a una solución explícita en el tiempo. La definición de “acciones elementales” y “parámetros de control”, contribuyen a una mayor eficiencia computacional del método. Mediante las “acciones elementales” se definen los tipos de acciones a las que se somete el acuífero (como pueden ser recarga por lluvia, bombeos, retornos de riego, etc). Con los “parámetros de control” se definen las variables cuyo seguimiento puede ser interesante, ya sea a efectos de información o a efectos de influir en la gestión que se realice del acuífero (AQUIVAL, 2012).

Como explica el Manual de Usuario AQUIVAL2 (2012), el programa requiere la preparación de una serie de datos que describen la definición física del acuífero, sus propiedades de flujo, las acciones exteriores, el tipo de resultados esperados, etc. Algunos procesos generan resultados que son requeridos como datos para otros procesos. Estos datos pueden introducirse en un solo archivo o separados según procesos.

Todos los datos van procedidos por una etiqueta delimitada por los símbolos <> (menor y mayor). No se requiere un orden en la posición de cada conjunto de datos en el archivo. Los datos en cada línea han de ir separados por espacio o por tabulación. A

continuación se describe los datos requeridos en cada proceso junto con la su etiqueta identificativa (Manual de Usuario AQUIVAL 2, 2012).

4.2.1.1 DATOS PARA LA DEFINICIÓN DEL MODELO FÍSICO

Para la explicación de este apartado, se ha tomado la información del Manual de Usuario de Aquival 2.0 “Módulos de Cálculo en la Simulación de Acuíferos por el Método de Autovalores” (Manual de Usuario AQUIVAL 2, 2012).

DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA

Como primera instancia, para la definición de simulación de un acuífero, es preciso definir su discretización en celdas, por lo que para generar un modelo en diferencias finitas, es necesario proporcionar los siguientes datos:

- Número de filas de la malla.
- Número de columnas de la malla.
- Tipo de celda (activa, inactiva, nivel constante o conexión perfecta).
- Ancho de fila.
- Ancho de columna.
- Capa (unicapa o multicapa)

DEFINICIÓN DE PROPIEDADES HIDRÁULICAS

En segundo lugar, se requieren las propiedades de almacenamiento hidráulico y conductividad hidráulica (en dirección X y dirección Y), así como el espesor para cada una de las celdas activas en el modelo.

DEFINICIÓN DE CONDICIONES DE CONTORNO

Una vez que se tienen los datos anteriores, el software puede proceder con la obtención de las matrices de conductividad y almacenamiento para el modelo de diferencias finitas. En este punto, el modelo puede considerar las salidas por manantial, contemplando la salida de caudal desde el acuífero a la zona de manantial, pero no al revés.

4.2.1.2 DATOS PARA LA FORMULACIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO

Básicamente, en este punto es necesario que el programa realice la transformación del sistema de ecuaciones de matrices a términos de Autovalores, donde los datos requeridos son obtenidos de los datos previamente proporcionados por el usuario.

DATOS PARA EL CÁLCULO DE AUTOVALORES Y AUTOVECTORES

En este punto, lo más importante es el paso del tiempo para las simulaciones; este paso considera el número de días por cada mes, por lo que se otorga un valor de 30 días.

DATOS PARA PARAMETRIZAR LAS ACCIONES EXTERIORES Y LOS RESULTADOS REQUERIDOS

Ahora bien, se necesitan los datos para la definición de las “acciones elementales” y los “parámetros de control”. Las acciones elementales, son un conjunto de celdas y coeficientes de reparto donde se aplicará durante la simulación cada una de las series temporales de acciones exteriores. Por su parte, los parámetros de control son cada uno de los resultados que se esperan obtener de la simulación del modelo.

DATOS PARA DEFINIR LA CONDICIÓN INICIAL

De la misma forma, se requieren los valores de las alturas iniciales por celdas, este dato puede ser omitido, ya que el programa puede tomar el valor inicial como 0 (cero).

4.2.1.3 DATOS PARA LA SIMULACIÓN TEMPORAL DEL ACUÍFERO

Después del proceso anterior, se dispone de los parámetros necesarios para realizar la simulación de la evolución temporal del acuífero; adicionalmente, se requieren las series temporales de acciones asignadas a las acciones elementales definidas antes.

4.2.2 INTERFAZ DEL SOFTWARE

La documentación sobre el software Aquival se encuentra disponible en el website de la UPV (UPV, 2017).

Aquival es una aplicación ejecutable, la cual se complementa con una hoja de cálculo habilitada para macros de Microsoft Excel, en la cual se ingresan todos los datos para que

la aplicación pueda ser ejecutada a partir de un archivo tipo "*.txt" con la ayuda de un archivo tipo "*.log", que son archivos que contienen mensajes sobre el sistema, incluyendo el kernel, los servicios y las aplicaciones que se ejecutan en dicho sistema.

A continuación, se describe el procedimiento para realizar una simulación con Aquival:

1. Definir filas, columnas y capas.
2. Realizar la numeración de celdas.
3. Asignar el tipo de celda (0, 1, 2 según la conexión o estado activo/inactivo).
4. Determinar la dimensión de las celdas (ancho de fila y de columna).
5. Definir la matriz del espesor del estrato.
6. Definir la matriz de conductividad hidráulica según la geología (tanto para el sentido X como para el Y).
7. Definir la matriz del coeficiente de almacenamiento según la geología.
8. Definir las condiciones de contorno, como son número de manantiales dentro del acuífero por medio de su ubicación espacial (celdas), el valor de la conductancia y el nivel para cada celda.
9. Definir las acciones elementales (número y nombre).
10. Asignación de valores para la distribución ponderada de las acciones elementales, donde se toman en cuenta extracciones y recargas.
11. Definir parámetros de control (número, nombre y ubicación espacial (celdas)).
12. Definir matriz de las alturas iniciales para el acuífero.
13. Determinar el tiempo de simulación, en meses.
14. Agregar las series de recarga (acciones elementales) para la simulación; en este punto es importante destacar que la serie debe coincidir con el periodo de simulación.

5 RESULTADOS

5.1 GENERALIDADES

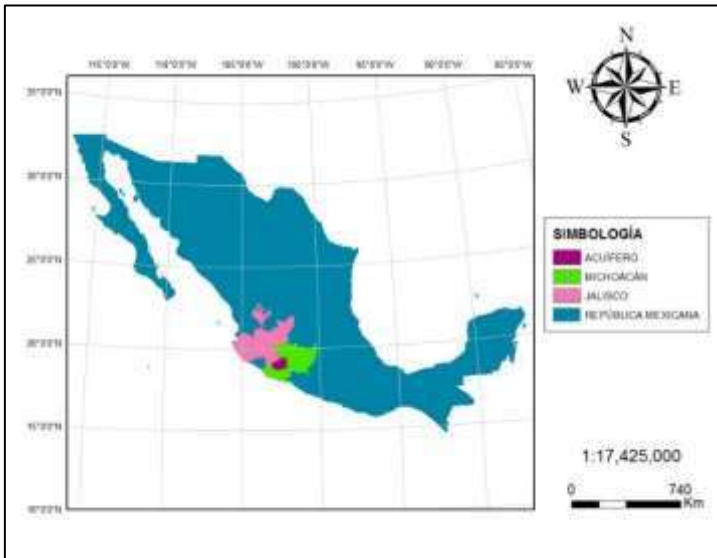


Figura 32. Macrolocalización del acuífero Apatzingán. Elaboración propia.

La primera parte del trabajo se realiza con el Sistema de Información Geográfica ArcGis, por medio del cual se pueden realizar los procesos necesarios para obtener los valores que se utilizan en la modelación superficial (EvalHid) y subterránea (Aquivall).

Como parte importante de éste trabajo se deben conocer las generalidades de la zona en estudio, así como la distribución espacial que solo gráficamente se puede apreciar, siendo esta una forma didáctica que nos ayuda a manipular la información de manera más eficiente con ayuda de la plataforma es por ello que en las figuras 32 y 33 se presentan la macrolocalización del acuífero Apatzingán, donde se puede observar que se encuentra en la parte oeste del estado de Michoacán, prácticamente en la frontera con el estado de Jalisco.

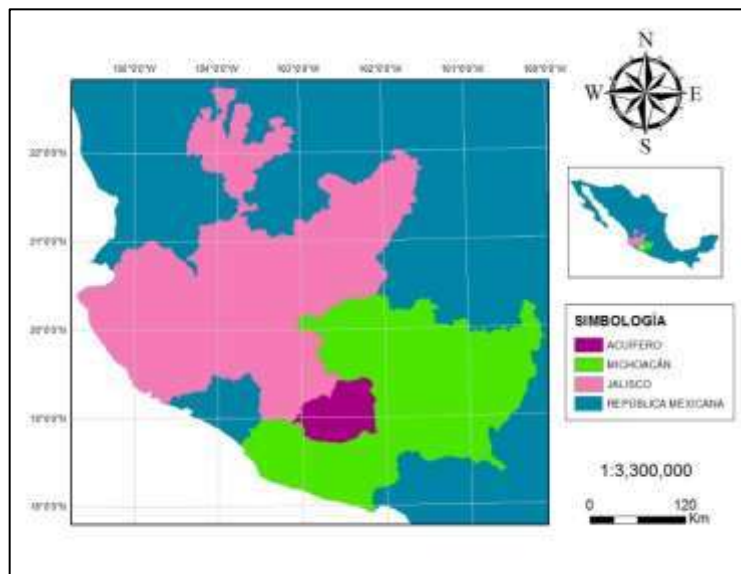


Figura 33. Macrolocalización del acuífero Apatzingán a nivel estatal. Elaboración propia.

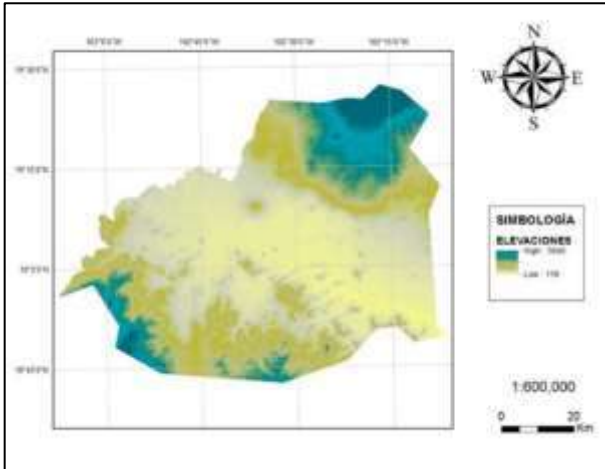


Figura 34. Modelo digital de elevaciones del acuífero Apatzingán. Elaboración propia.

En la figura 34, se aprecia que el acuífero Apatzingán se encuentra en una zona montañosa, es por ello que en la figura 6 se observa que la parte central del mismo presenta las elevaciones más bajas.

Se observa en la figura 35, que el acuífero Apatzingán tiene dominio sobre 10 municipios del estado de Michoacán, donde los seis sobre los que tiene mayor influencia son: Tepalcatepec, Buenavista, Apatzingán, Tancítaro, Parácuaro y Aguililla.



Figura 35. Influencia del acuífero Apatzingán en los municipios aledaños. Elaboración propia.

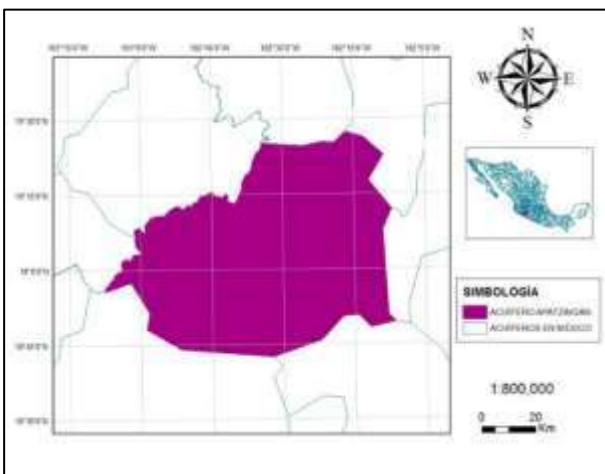


Figura 36. Distribución de los acuíferos en México. Elaboración propia.

En la figura 36, se muestra el acuífero Apatzingán, el cual es uno de los 653 acuíferos que contiene el territorio Mexicano. Es conveniente advertir que en ese caso, la importancia del estudio del acuífero radica en la zona agrícola perteneciente al distrito de riego 097 “Lázaro Cárdenas”.

Dentro del acuífero Apatzingán, como se aprecia en la figura 37, se encuentra el distrito de riego 097 “Lázaro Cárdenas”, esta zona es importante debido a su injerencia en varios municipios del estado de Michoacán, el cual aporta ingresos económicos importantes, ya que el 31.8% de la producción nacional de limón agro proviene de ésta zona.

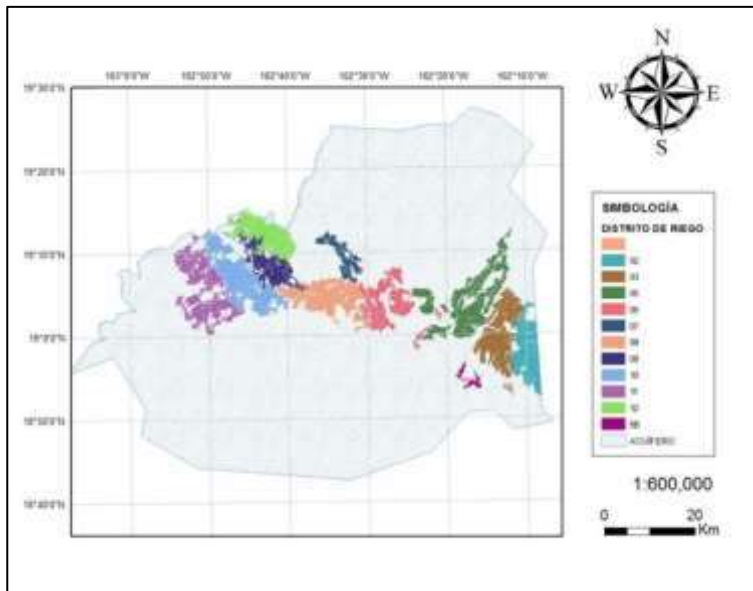


Figura 37. Distrito de Riego 097 “Lázaro Cárdenas” dentro del acuífero Apatzingán. Elaboración propia.



Figura 38. Localización hidrológica del acuífero Apatzingán. Elaboración propia.

El acuífero Apatzingán forma parte de dos de las trece regiones hidrológicas en las que se encuentra dividido el territorio mexicano; como se aprecia en la figura 38, la región hidrológica Balsas contiene el 80% del acuífero Apatzingán, el otro 20% se encuentra en la región Lerma-Santiago.

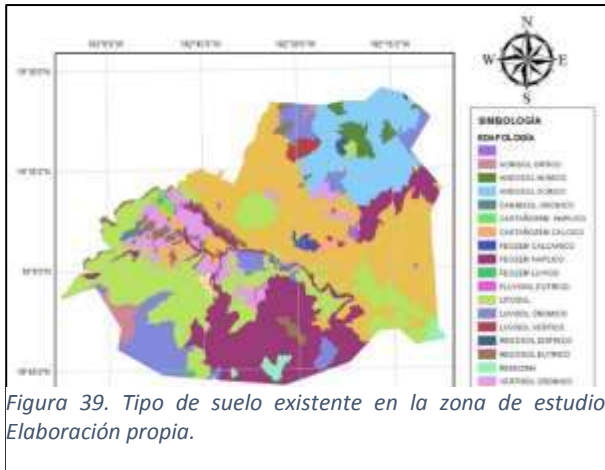


Figura 39. Tipo de suelo existente en la zona de estudio. Elaboración propia.

En la figura 39, se señalan los 19 tipos de suelo que tiene el acuífero Apatzingán, a su vez, de los 12 principales, tenemos que los seis que destacan en esta región son (INEGI, 2004):

- Acrisol. Suelo ácido, que se encuentra en zonas tropicales o templadas muy lluviosas, son moderadamente susceptibles a la erosión y el uso más adecuado para su conservación es el forestal.
- Andosol. Suelo origen volcánico oscuro y poroso; el uso más favorable para su conservación es el forestal y es muy susceptible a la erosión eólica. Generalmente tiene un rendimiento bajo agrícola debido a que retiene considerablemente el fósforo y éste puede ser absorbido por las plantas, es por ello que con programas adecuados de fertilización, muchas regiones aguacateras de Michoacán consiguen rendimientos muy altos.
- Feozem. Capa superficial oscura, suave, rico en materia orgánica y nutrientes, tiene rendimientos bajos y se erosiona con facilidad.
- Litosol. Suelos de piedra, su profundidad menor a 10 cm limitada por roca, tepetate o caliche endurecido, en algunos casos se destina a la agricultura.
- Luvisol. Suelo con acumulación de arcilla, que se destina principalmente a la agricultura con rendimiento moderado, con alta susceptibilidad a la erosión.
- Vertisol. Es un suelo que se revuelve; se caracteriza por su estructura masiva y su alto contenido de arcilla. Tiene baja susceptibilidad a la erosión y alto riesgo e salinización.

Tabla 11. Usos de suelo en la zona de estudio.

SIMBOLOGÍA	
APATZINGÁN USO DE SUELO	
DESCRIPCIÓN	
[Color]	AGRICULTURA DE REGO ANUAL
[Color]	AGRICULTURA DE REGO ANUAL Y PERMANENTE
[Color]	AGRICULTURA DE REGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE
[Color]	AGRICULTURA DE REGO PERMANENTE
[Color]	AGRICULTURA DE REGO SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE
[Color]	AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL
[Color]	AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE
[Color]	AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y SEMIPERMANENTE
[Color]	AGRICULTURA DE TEMPORAL PERMANENTE
[Color]	ASENTAMIENTOS HUMANOS
[Color]	BOSQUE DE ENCINO
[Color]	BOSQUE DE PINO
[Color]	BOSQUE DE PINO-ENCINO
[Color]	CUERPO DE AGUA
[Color]	PASTIZAL CULTIVADO
[Color]	PASTIZAL INDUCIDO
[Color]	SABANDE
[Color]	SELVA BAJA CADUCIFOLIA
[Color]	SIN VEGETACIÓN APARENTE
[Color]	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO
[Color]	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO
[Color]	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO
[Color]	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO
[Color]	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA
[Color]	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO
[Color]	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO
[Color]	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO
[Color]	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA
[Color]	ZONA URBANA

Como se puede observar en la figura 40, el principal uso que se le otorga a la zona del acuífero Apatzingán es el agrícola (con 43% del acuífero); también se cuenta con una zona de bosque que representa el 16% del área en estudio.

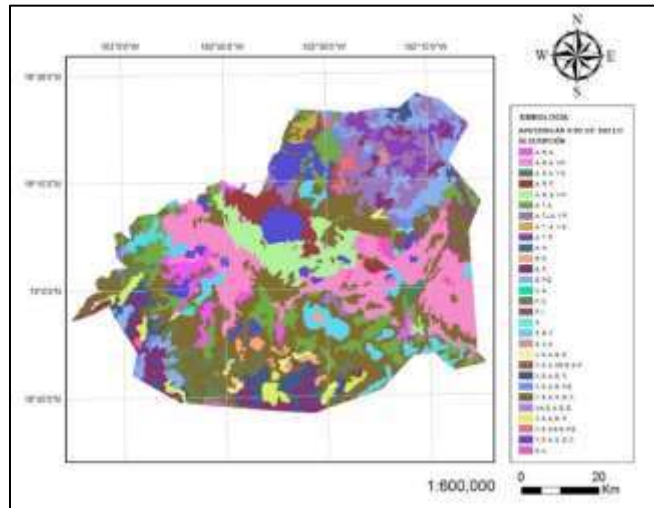


Figura 40. Uso de suelo en dentro del acuífero Apatzingán. Elaboración propia.

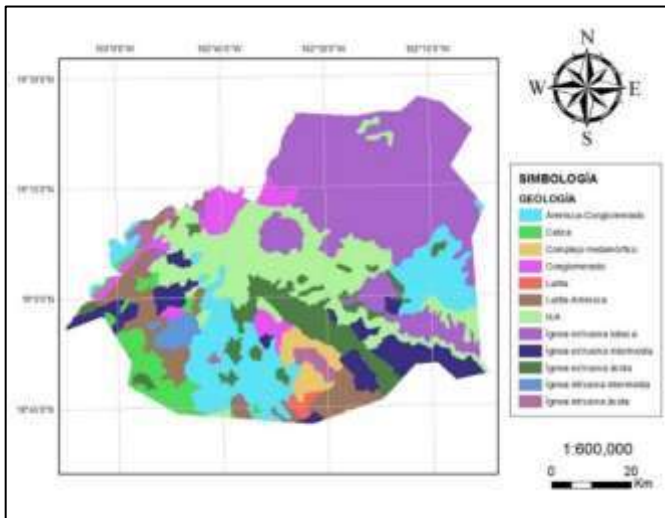


Figura 41. Mapa geológico del acuífero Apatzingán. Elaboración propia.

En la figura 41 se muestra la geología asociada al acuífero de estudio, donde los derrames lávicos formaron las cadenas montañosas en los valles que originalmente habían sido cuencas lacustres profundas; en ellas se ha ido depositando material fluvial y lacustre derivado de las montañas y enormes cantidades de cenizas volcánicas de los volcanes más recientes, lo que ha propiciado el desarrollo del sistema acuífero actual.

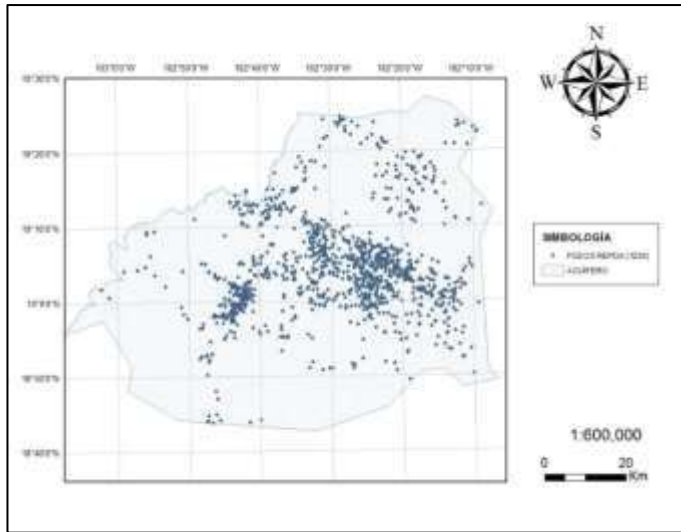


Figura 42. Concesiones otorgadas por el REPDA en el acuífero Apatzingán. Elaboración propia.

En la figura 42, se muestran los 1230 pozos, que extraen un volumen de 268.44 hm³, de los cuales se tiene que el 86% son utilizados para uso agrícola.

Como se muestra en la figura 43, el distrito de riego 097 se ubica en el occidente de la entidad, en la franja conocida como Tierra Caliente, en el valle de Apatzingán y la cuenca de Tepalcatepec; está integrado por cuatro unidades y conformado por trece módulos de riego, que atienden 71 mil 140 hectáreas de riego en beneficio de 10 mil 951 productores.

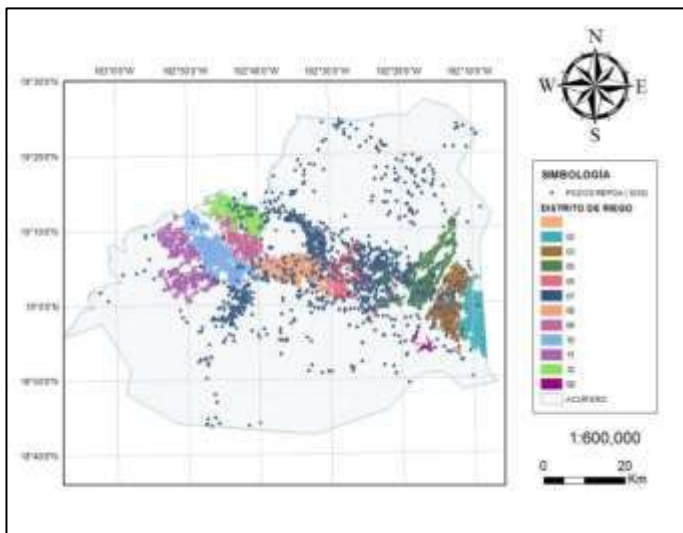


Figura 43. Mapa de cruce de concesiones otorgadas por el REPDA y el distrito de riego 097. Elaboración propia.

La producción de cultivos que se concentra en cítricos y frutales (52%), seguidos de los granos (29%), pastos y forrajes (13%) y en menor número están las hortalizas (6%); por lo que casi un 1.1 millones de toneladas son producidas anualmente.

En México se tienen 2306 estaciones hidrométricas, para este presente trabajo se utilizarán solamente cuatro, con las cuales se pueden generar las cuencas de simulación necesarias que cubra el acuífero Apatzingán en su totalidad.

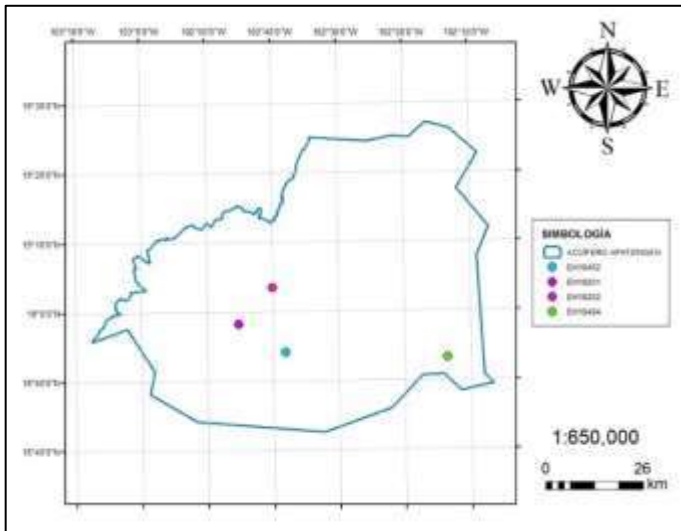


Figura 44. Estaciones hidrométricas utilizadas para la generación de cuencas. Elaboración propia.

Las cuencas de simulación parten de la ubicación de las estaciones hidrométricas; para el caso, se utilizaron las estaciones hidrométricas: 18201, 18202, 18452, 18494, que se encuentran marcadas en la figura 44. Por ello, las cuencas generadas tienen el mismo nombre de las estaciones de donde provienen.

En la figura 45, se aprecia que las cuencas 18201, 18202, 18452 se encuentran dentro de la cuenca 18494, y, aunque esto suceda, se siguen considerando debido a la información que podemos obtener de ellas debido a la discretización del acuífero.

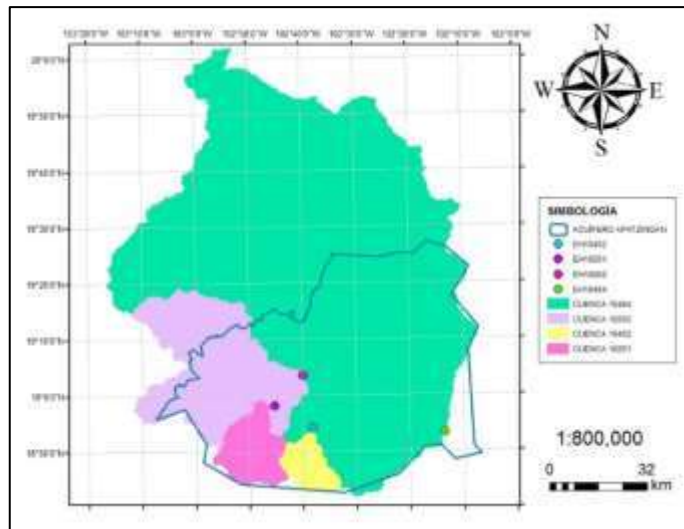


Figura 45. Cuencas de simulación generadas con las estaciones hidrométricas. Elaboración propia.

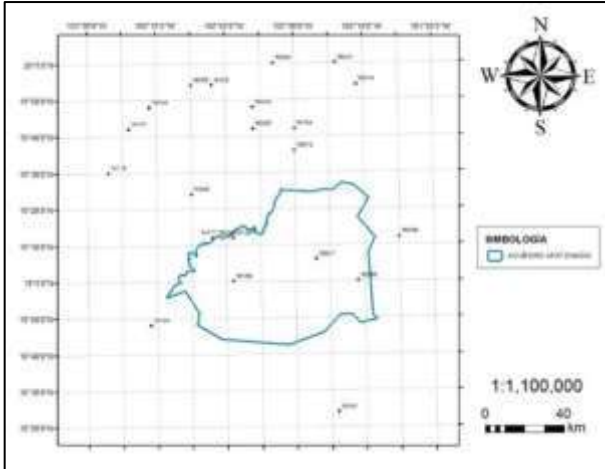


Figura 46. Estaciones meteorológicas a utilizar para el estudio hidrológico. Elaboración propia.

En la figura 46 se muestran las 22 estaciones cercanas de las cuales obtendremos información para poder realizar el balance hídrico en la zona.

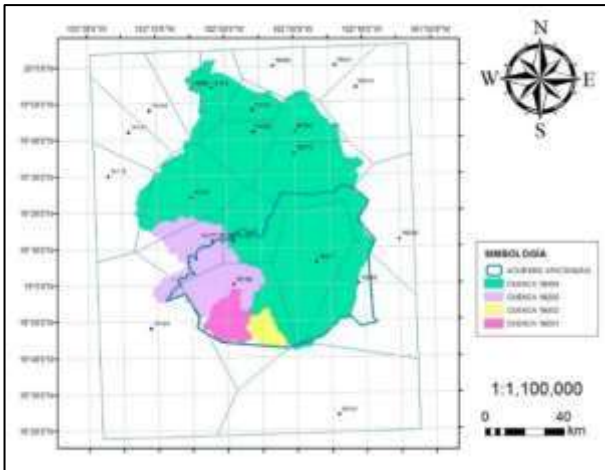


Figura 47. Polígonos de Thiessen realizados a partir de las estaciones meteorológicas en la zona de estudio. Elaboración propia.

Para verificar que las estaciones meteorológicas utilizadas tienen influencia en el acuífero Apatzingán, se obtienen polígonos de Thiessen (figura 47), por medio de los cuales se puede verificar que todas las estaciones tienen injerencia en las cuencas de simulación, y, aunque sea un área muy pequeña, es importante que sean tomadas en cuenta.

En base a los polígonos de Thiessen, se puede continuar con dos vertientes: la primera es generando una estación ficticia para cada cuenca de simulación, lo que resulta simple al momento de realizar el modelado en EvalHid, la segunda es particionando las cuencas de simulación, lo que quiere decir que se realizarán microcuencas en la zona de estudio, de modo que se obtengan áreas más pequeñas, así, se pueden tener diferentes series de datos (precipitación, evapotranspiración y temperatura) para cada una de las microcuencas generadas.

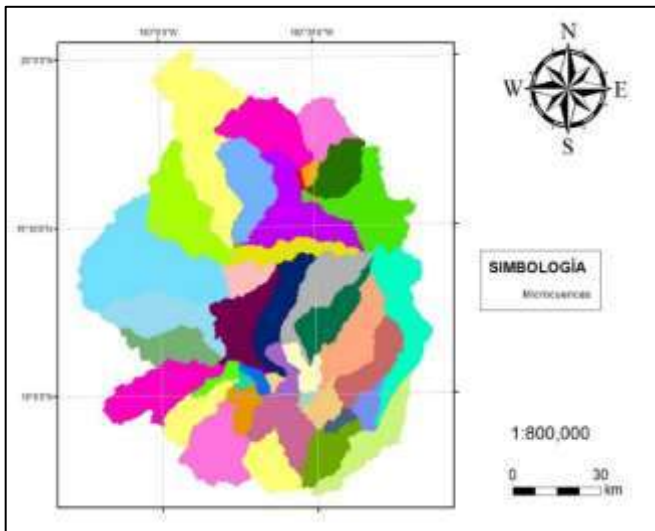


Figura 48. Microcuencas generadas a partir de las cuencas de simulación. Elaboración propia.

Al generar las microcuencas de la zona de estudio, se tiene la ventaja de que el manejo de datos es más específico, ya que no se está considerando una estación ficticia para un área de 9268.3 km², por lo que para este caso y como se muestra en la figura 48, se puede considerar dentro de la misma área en estudio la existencia de 31 microcuencas con superficies variables de 20 km² a 500 km², lo que permite un manejo más preciso en la gestión de datos.

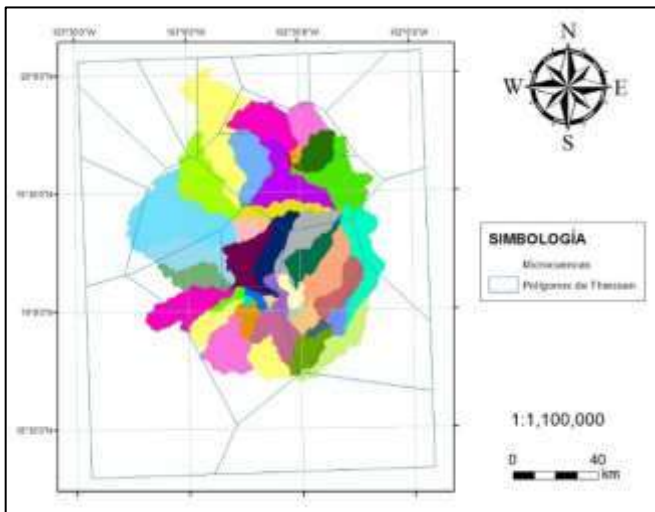


Figura 49. Influencia de los polígonos de Thiessen sobre las microcuencas. Elaboración propia.

Por otra parte, en la figura 49 se puede apreciar que los polígonos de Thiessen ahora cubren microcuencas de forma completa, lo que es interesante al momento de obtener las series de datos necesarias para la modelación, ya que no deben realizarse estaciones ficticias para áreas grandes, lo que posibilita una reducción de incertidumbre sobre los resultados.

5.2 GESTIÓN DE DATOS

Para la gestión de datos se obtuvieron los datos de la base de datos de clima computarizado (CLICOM); los datos que se obtienen suelen tener inconsistencias y vacíos, es por ello que se debe tener especial cuidado con el manejo de estos.

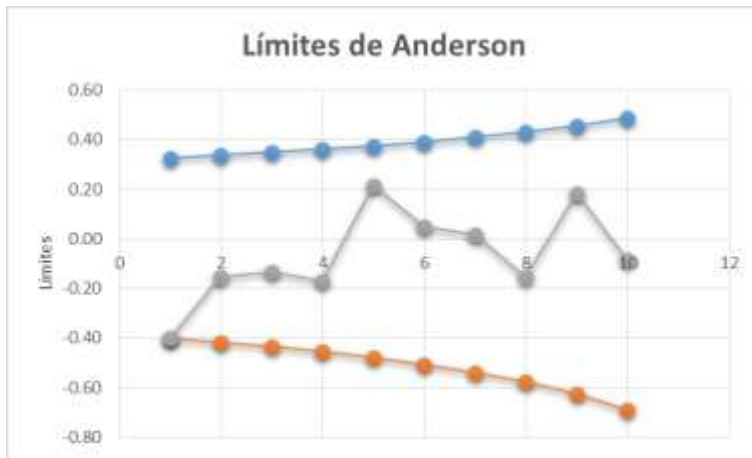
Las pruebas de validación que se aplican a la serie de datos son para homogeneidad (Helmert y Secuencias) e independencia (límites de Anderson).

Una de las estaciones principales que se ubica en el centro del acuífero es la 16007: Apatzingán (SMN), Michoacán, la cual tiene el mayor periodo de años en estudio, y el menor porcentaje de datos vacíos, que se presentan en la tabla 12.

Tabla 12. Resumen de la estación meteorológica 16007.

Años en servicio	90.2
Años efectivos	88.8
Meses llenos	1066
Meses vacíos	16
% de vacíos	1.48%

En dicha estación, se realizaron los test de Helmert y el test de Secuencias para conocer su homogeneidad; al pasar los dos métodos con resultados adecuados la estación se considera homogénea.



Gráfica 1. Resultado de los límites de Anderson para la estación 16007.

Para verificar la independencia de la serie de datos, se utilizó el método de límites de Anderson, por medio de 10 desfases, que se muestran en la gráfica 1, donde se aprecia que los valores quedan dentro de los límites, lo que nos muestra que la estación es independiente.



Gráfica 2. Promedios mensuales para la estación Apatzingán 16007, comparativa entre datos con vacíos y llenos.

En la gráfica 2, se comparan los valores medios mensuales del periodo en estudio, por lo que se observa que no existe un cambio significativo entre los datos con vacíos frente a los datos llenos; así mismo, se sabe que la estación se mantiene homogénea e independiente, donde la serie tratada (datos

llenos) supera los valores medios anuales por un 0.06% respecto a los valores con vacíos.

En la tabla 13, se tiene el cruce de las estaciones, en las cuales, aquellas que están en color verde pueden ser utilizadas para el llenado de estaciones por el método IDC.

Tabla 13. Matriz de correlación entre estaciones meteorológicas.

	6010	14034	14099	14118	14141	14177	14180	14348	16006	16007	16014	16025	16031	16039	16043	16073	16090	16094	16128	16151	16154	16158	16194
6010	1.00	0.67	0.59	0.00	0.66	0.57	0.59	0.59	0.62	0.62	0.63	0.65	0.61	0.54	0.61	0.64	0.55	0.60	0.59	0.49	0.57	0.62	0.56
14034	0.67	1.00	0.84	0.00	0.91	0.79	0.83	0.74	0.75	0.81	0.87	0.79	0.84	0.71	0.84	0.83	0.74	0.82	0.77	0.69	0.71	0.80	0.77
14099	0.59	0.84	1.00	0.90	0.87	0.73	0.88	0.68	0.69	0.78	0.84	0.80	0.83	0.73	0.87	0.80	0.78	0.84	0.78	0.68	0.71	0.77	0.79
14118	0.00	0.00	0.90	1.00	0.88	0.00	0.85	0.00	0.00	0.82	0.85	0.73	0.83	0.00	0.86	0.87	0.00	0.84	0.79	0.00	0.74	0.82	0.83
14141	0.66	0.91	0.87	0.88	1.00	0.80	0.88	0.76	0.78	0.82	0.86	0.79	0.85	0.74	0.87	0.87	0.78	0.84	0.79	0.75	0.73	0.80	0.80
14177	0.57	0.79	0.73	0.00	0.80	1.00	0.81	0.77	0.79	0.86	0.76	0.67	0.77	0.91	0.80	0.83	0.91	0.82	0.94	0.72	0.69	0.84	0.81
14180	0.59	0.83	0.88	0.85	0.88	0.81	1.00	0.70	0.77	0.80	0.85	0.79	0.83	0.77	0.89	0.87	0.80	0.87	0.80	0.73	0.71	0.78	0.84
14348	0.59	0.74	0.68	0.00	0.76	0.77	0.70	1.00	0.66	0.70	0.63	0.31	0.63	0.65	0.64	0.72	0.69	0.67	0.88	0.59	0.57	0.83	0.67
16006	0.62	0.75	0.69	0.00	0.78	0.79	0.77	0.66	1.00	0.81	0.75	0.68	0.73	0.74	0.74	0.81	0.79	0.78	0.76	0.71	0.68	0.76	0.76
16007	0.62	0.81	0.78	0.82	0.82	0.86	0.80	0.70	0.81	1.00	0.78	0.71	0.77	0.78	0.78	0.79	0.82	0.77	0.84	0.76	0.70	0.85	0.77
16014	0.63	0.87	0.84	0.85	0.86	0.76	0.85	0.63	0.75	0.78	1.00	0.79	0.91	0.69	0.85	0.83	0.74	0.87	0.78	0.64	0.67	0.78	0.81
16025	0.65	0.79	0.80	0.73	0.79	0.67	0.79	0.31	0.68	0.71	0.79	1.00	0.80	0.65	0.84	0.79	0.65	0.75	0.76	0.64	0.64	0.71	0.72
16031	0.61	0.84	0.83	0.83	0.85	0.77	0.83	0.63	0.73	0.77	0.91	0.80	1.00	0.67	0.84	0.83	0.73	0.87	0.78	0.65	0.65	0.76	0.83
16039	0.54	0.71	0.73	0.00	0.74	0.91	0.77	0.65	0.74	0.78	0.69	0.65	0.67	1.00	0.71	0.77	0.93	0.73	0.88	0.69	0.67	0.83	0.73
16043	0.61	0.84	0.87	0.86	0.87	0.80	0.89	0.64	0.74	0.78	0.85	0.84	0.84	0.71	1.00	0.86	0.77	0.86	0.80	0.71	0.70	0.79	0.82
16073	0.64	0.83	0.80	0.87	0.87	0.83	0.87	0.72	0.81	0.79	0.83	0.79	0.83	0.77	0.86	1.00	0.84	0.85	0.85	0.75	0.75	0.83	0.85
16090	0.55	0.74	0.78	0.00	0.78	0.91	0.80	0.69	0.79	0.82	0.74	0.65	0.73	0.93	0.77	0.84	1.00	0.78	0.90	0.76	0.71	0.83	0.78
16094	0.60	0.82	0.84	0.84	0.84	0.82	0.87	0.67	0.78	0.77	0.87	0.75	0.87	0.73	0.86	0.85	0.78	1.00	0.80	0.67	0.68	0.77	0.97
16128	0.59	0.77	0.78	0.79	0.79	0.94	0.80	0.88	0.76	0.84	0.78	0.76	0.78	0.88	0.80	0.85	0.90	0.80	1.00	0.71	0.70	0.85	0.81
16151	0.49	0.69	0.68	0.00	0.75	0.72	0.73	0.59	0.71	0.76	0.64	0.64	0.65	0.69	0.71	0.75	0.76	0.67	0.71	1.00	0.62	0.78	0.66
16154	0.57	0.71	0.71	0.74	0.73	0.69	0.71	0.57	0.68	0.70	0.67	0.64	0.65	0.67	0.70	0.75	0.71	0.68	0.70	0.62	1.00	0.70	0.69
16158	0.62	0.80	0.77	0.82	0.80	0.84	0.78	0.83	0.76	0.85	0.78	0.71	0.76	0.83	0.79	0.83	0.83	0.77	0.85	0.78	0.70	1.00	0.75
16194	0.56	0.77	0.79	0.83	0.80	0.81	0.84	0.67	0.76	0.77	0.81	0.72	0.83	0.73	0.82	0.85	0.78	0.97	0.81	0.66	0.69	0.75	1.00

En este caso, se estudiaron 22 estaciones climatológicas, a las cuales se les aplicaron las pruebas de consistencia pertinentes para ver si cumplían con los requerimientos; con lo que los resultados se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Compilación de información y resultado de la validación de datos en las estaciones meteorológicas.

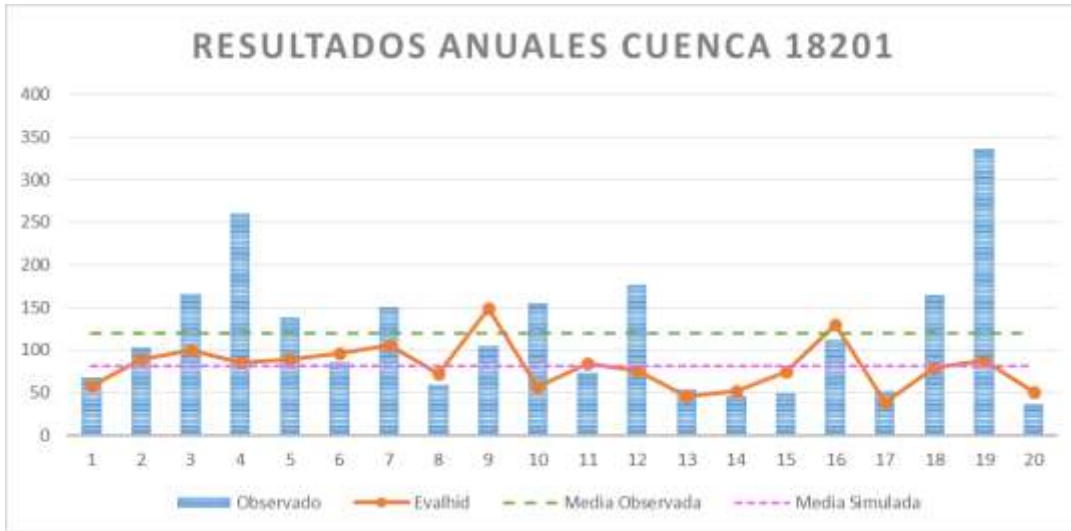
ESTACIÓN	NOMBRE	W	N	SERVICIO EFECTIVO	% VACÍOS	PMA	PRUEBAS				
							L. ANDERSON	SECUENCIAS	HELMERT		
1	14034	Contla, Jal	-103.2	19.8	40.3	40.3	1.2%	1133.1	IND.	HOM.	HOM.
2	14099	Mazamitla, Jal	-103.0	19.9	63.5	61.2	3.7%	1006.2	IND.	HOM.	HOM.
3	14118	Quito, Jal	-103.4	19.4	12.0	11.4	4.9%	852.0	IND.	HOM.	HOM.
4	14141	Ingenio Tamazula, Jal	-103.3	19.7	88.1	73.5	16.6%	1015.4	IND.	HOM.	HOM.
5	14177	Los Olivos, Jal	-102.9	19.2	29.5	29.5	0.0%	675.2	IND.	HOM.	HOM.
6	14180	Quitupan, Jal	-102.9	19.9	64.5	61.4	4.8%	816.3	IND.	HOM.	HOM.
7	14348	Jilotlán, Jal	-103.0	19.4	29.2	26.1	10.6%	786.1	IND.	HOM.	HOM.
8	16006	Antúnez, Mich	-102.2	19.9	50.8	49.6	2.5%	700.7	IND.	HOM.	HOM.
9	16007	Apatzingán, Mich	-102.4	19.1	90.2	88.8	1.5%	737.0	IND.	HOM.	HOM.
10	16014	Camecuaro, mich	-102.2	19.9	56.3	55.8	0.9%	889.5	IND.	HOM.	HOM.
11	16025	Cotija, Mich	-102.7	19.7	61.0	55.6	8.9%	781.6	IND.	HOM.	HOM.
12	16031	Chaparaco, Mich	-102.3	20.0	50.3	50.2	0.3%	784.6	IND.	HOM.	HOM.
13	16039	Piedras Blancas, Mich	-102.8	19.2	51.8	50.8	1.8%	617.5	IND.	HOM.	HOM.
14	16043	El Puerto, Mich	-102.7	19.8	64.1	58.6	8.6%	733.7	IND.	HOM.	HOM.
15	16073	Los Limones, Mich	-102.5	19.6	43.3	42.5	1.9%	1015.4	IND.	HOM.	HOM.
16	16090	Piedras Blancas, Mich CFE	-102.8	19.2	39.9	35.1	12.1%	631.6	IND.	HOM.	HOM.
17	16094	Presa Huaracha, Mich	-102.6	20.0	56.5	55.6	1.6%	789.5	IND.	HOM.	HOM.
18	16128	Tepalcatepec, Mich	-102.8	19.2	41.0	36.1	12.0%	627.6	IND.	HOM.	HOM.
19	16151	Arteaga, Mich	-102.3	18.4	42.3	39.9	5.7%	873.1	IND.	HOM.	HOM.
20	16154	Coalcomán, Mich	-103.2	18.8	70.8	53.3	24.6%	1276.5	IND.	HOM.	HOM.
21	16158	El Cajón, Mich	-102.8	19.0	60.0	41.6	30.7%	872.9	IND.	HOM.	HOM.
22	16194	Tocumbo, Mich	-102.5	19.7	27.5	26.6	3.3%	1086.5	IND.	HOM.	NO HOM.

5.3 SIMULACIÓN EVALHID

5.3.1 RESULTADOS ANUALES

En las gráficas 3, 4, 5 y 6, se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones en las cuencas pertenecientes a las estaciones hidrométricas 18201, 18202, 18452 y 18494 respectivamente. Se puede apreciar que la tendencia de los resultados anuales es buena, más que nada en aquellos valores que están al centro de las series simuladas; esto se debe a que en el primer año se tiene una precalibración del modelo.

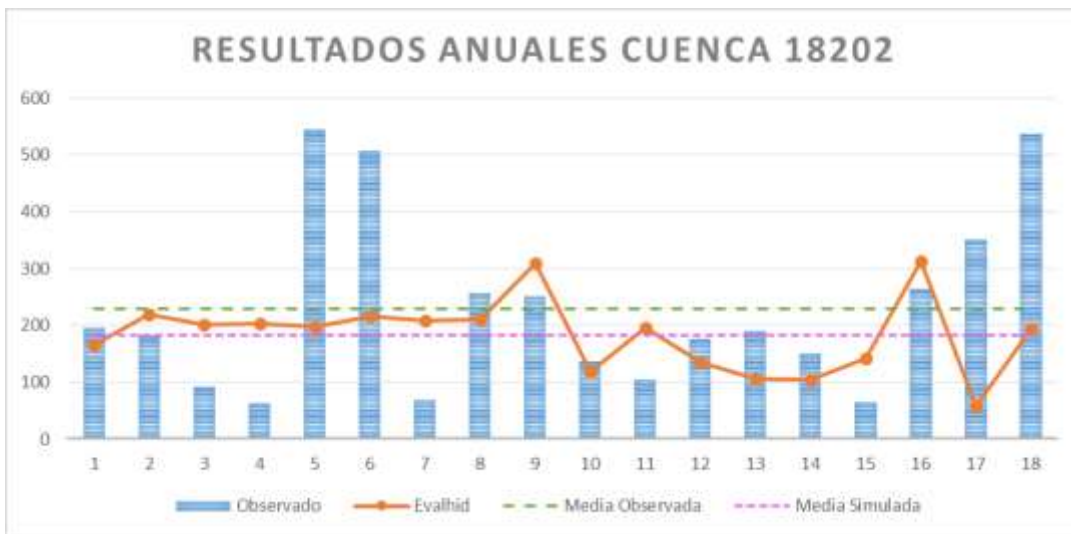
En algunos años el escurrimiento simulado es tan solo el 50% del escurrimiento observado, por lo que se propone un ajuste de balance, otorgando parte de la infiltración a la escorrentía superficial.



Gráfica 3. Resultados anuales de los escurrimientos en EvalHid en la cuenca 18201.

Tabla 15. Parámetros, eficiencia y variación de resultados en la cuenca 18201.

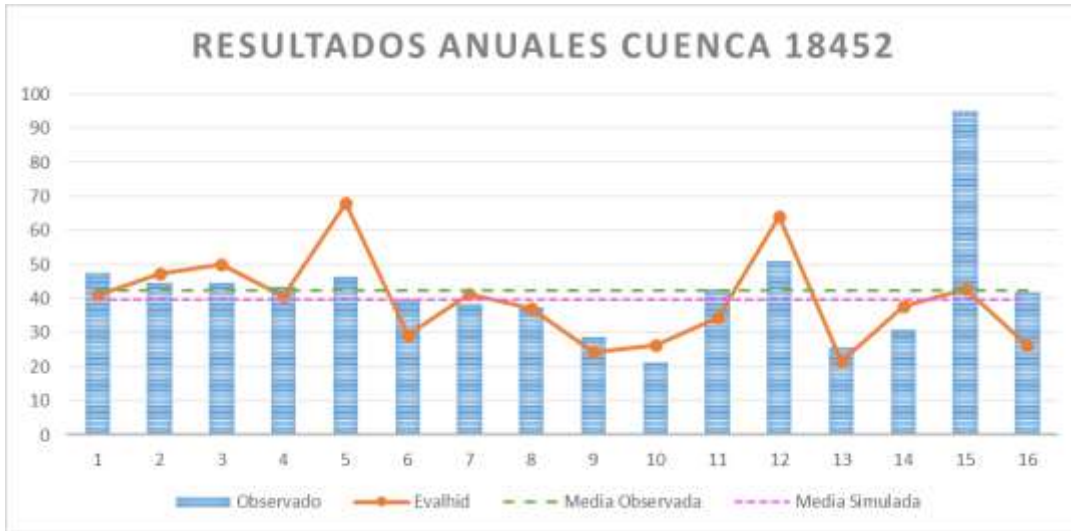
Cuenca	Eficiencia	Parámetros				Media Simulada	Media Observada	% variación
	<i>ln</i> NSE	H max	C	I max	Alfa			
18201	-0.8588	104.3536	0.2004	144.6777	0.8997	119.43	81.04	32.14%



Gráfica 4. Resultados anuales de los escurrimientos en EvalHid en la cuenca 18202.

Tabla 16. Parámetros, eficiencia y variación de resultados en la cuenca 18202.

Cuenca	Eficiencia	Parámetros				Media Simulada	Media Observada	% variación
	<i>ln</i> NSE	H max	C	I max	Alfa			
18202	-0.6284	378.6917	0.2002	24.8591	0.5032	229.80	183.23	20.27%



Gráfica 5. Resultados anuales de los escurrimientos en EvalHid en la cuenca 18452.

Tabla 17. Parámetros, eficiencia y variación de resultados en la cuenca 18452.

Cuenca	Eficiencia		Parámetros			Media Simulada	Media Observada	% variación
	In	NSE	H max	C	I max			
18452	-0.7925	263.0705	0.0213	51.0214	0.3987	42.49	39.56	6.89%



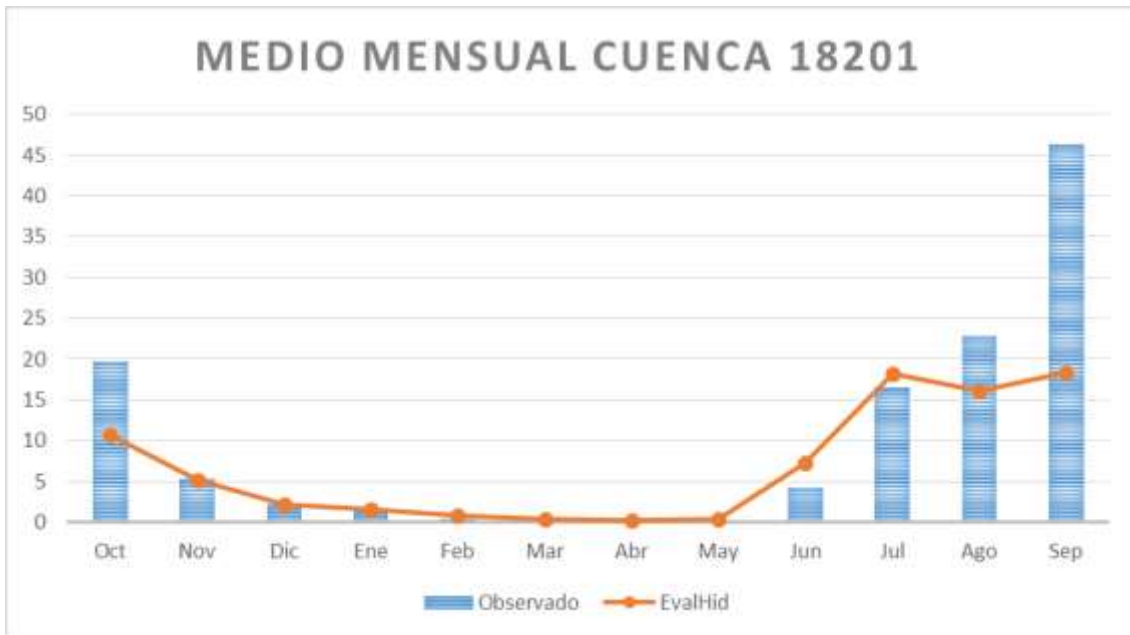
Gráfica 6. Resultados anuales de los escurrimientos en EvalHid en la cuenca 18494.

Tabla 18. Parámetros, eficiencia y variación de resultados en la cuenca 18494.

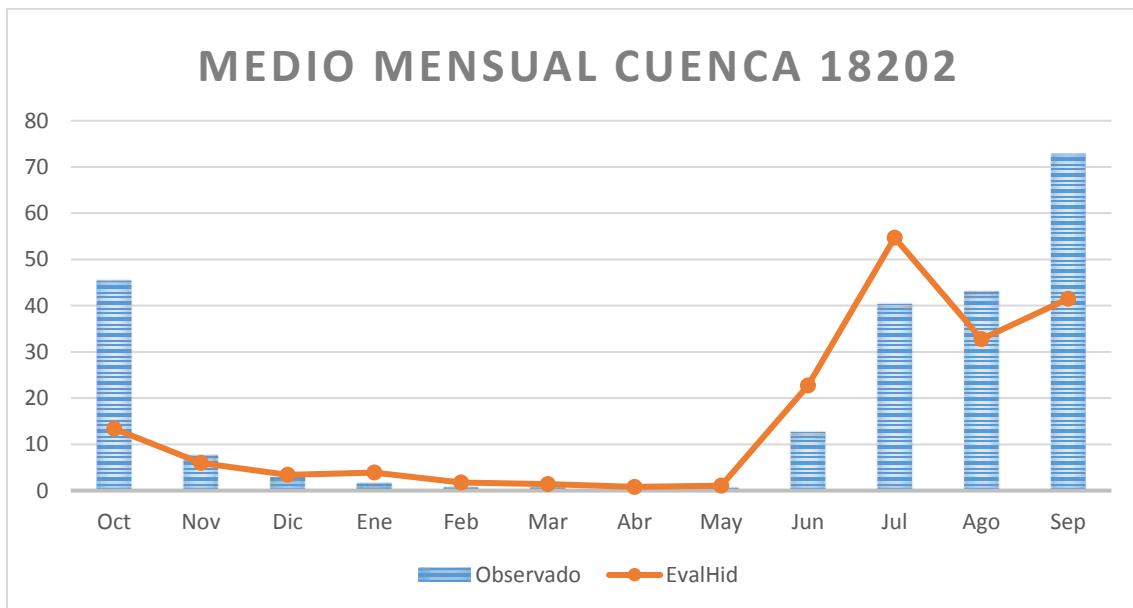
Cuenca	Eficiencia		Parámetros			Media Simulada	Media Observada	% variación
	In	NSE	H max	C	I max			
18494	-0.6005	238.1887	0.1003	38.5650	0.2549	1913.42	1656.57	13.42%

5.3.2 RESULTADOS AÑO MEDIO

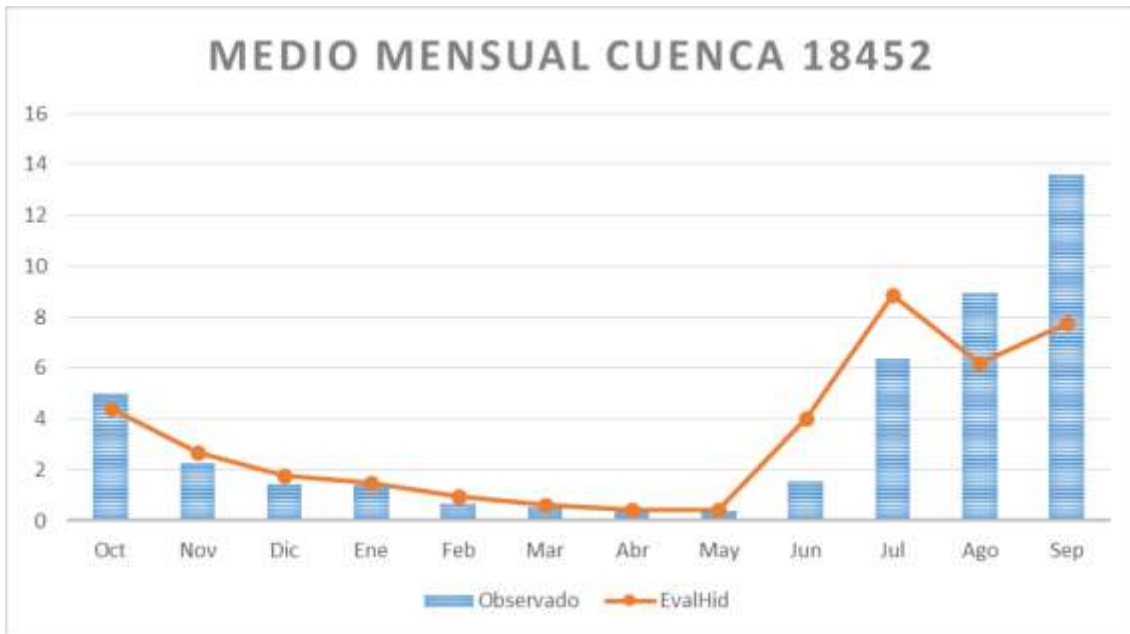
Para los resultados del año medio, se toma un promedio de los valores mensuales; se puede observar en las gráficas (7, 8, 9 y 10) que en los meses de lluvia (agosto, septiembre y octubre) se tiene un gasto simulado menor al observado.



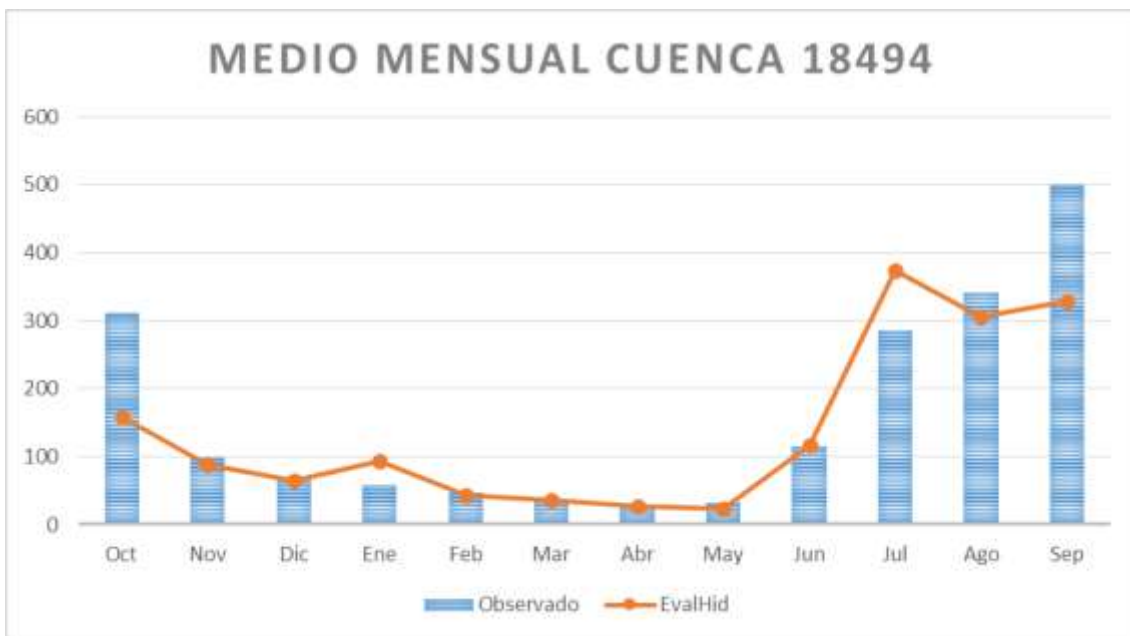
Gráfica 7. Resultados medios de los escurrimientos mensuales de EvalHid en la cuenca 18201.



Gráfica 8. Resultados medios de los escurrimientos mensuales de EvalHid en la cuenca 18202.



Gráfica 9. Resultados medios de los escurrimientos mensuales de EvalHid en la cuenca 18452.



Gráfica 10. Resultados medios de los escurrimientos mensuales de EvalHid en la cuenca 18494.

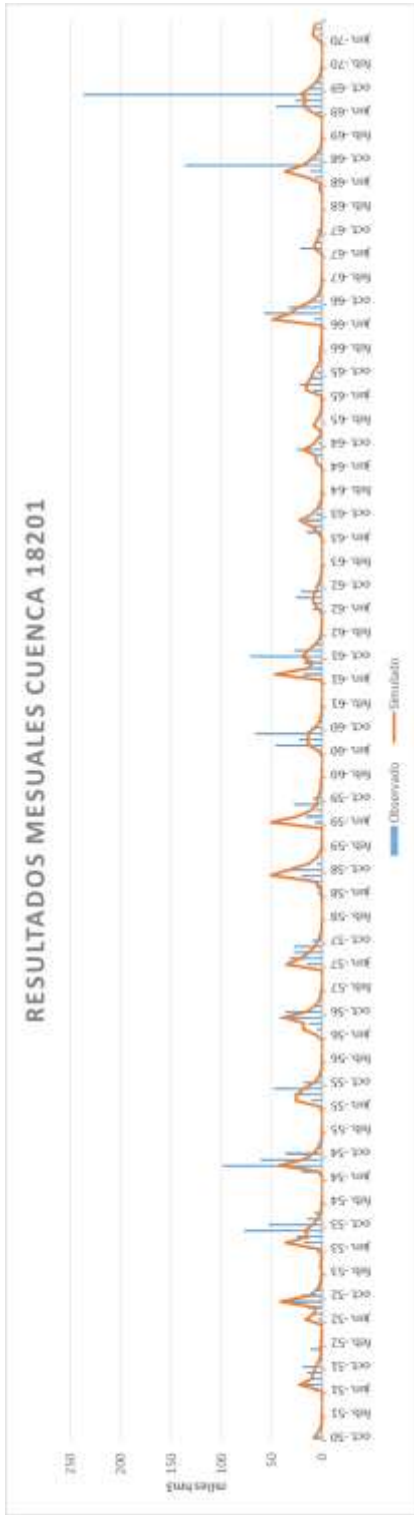
En las gráficas anteriores, también se puede observar que la tendencia de los resultados es la adecuada, así mismo, se aprecia que en el mes de julio se tiene un incremento, lo que logra que el volumen anual se compense.

5.3.3 RESULTADOS MENSUALES

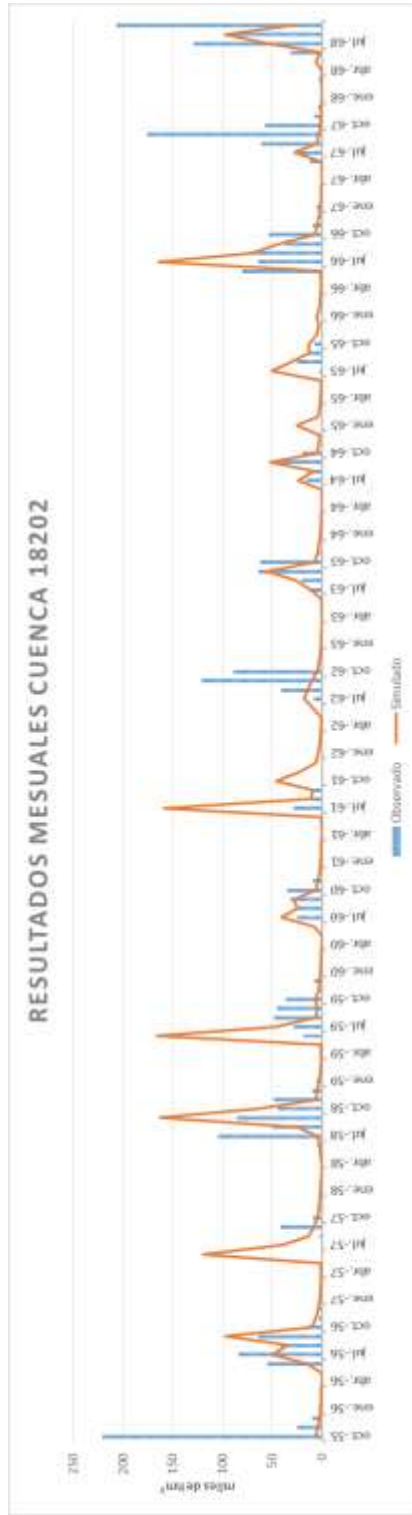
Los resultados mensuales se presentan en distintos periodos de tiempo, que dependían de los datos con los que se contaba en las estaciones hidrométricas.

En las gráficas de resultados mensuales, que corresponden a las 11, 12, 13 y 14 se observa que la similitud entre valores simulados y observados es buena, además de que la tendencia que mantiene los valores simulados evita que se disparen como lo hacen los datos observados.

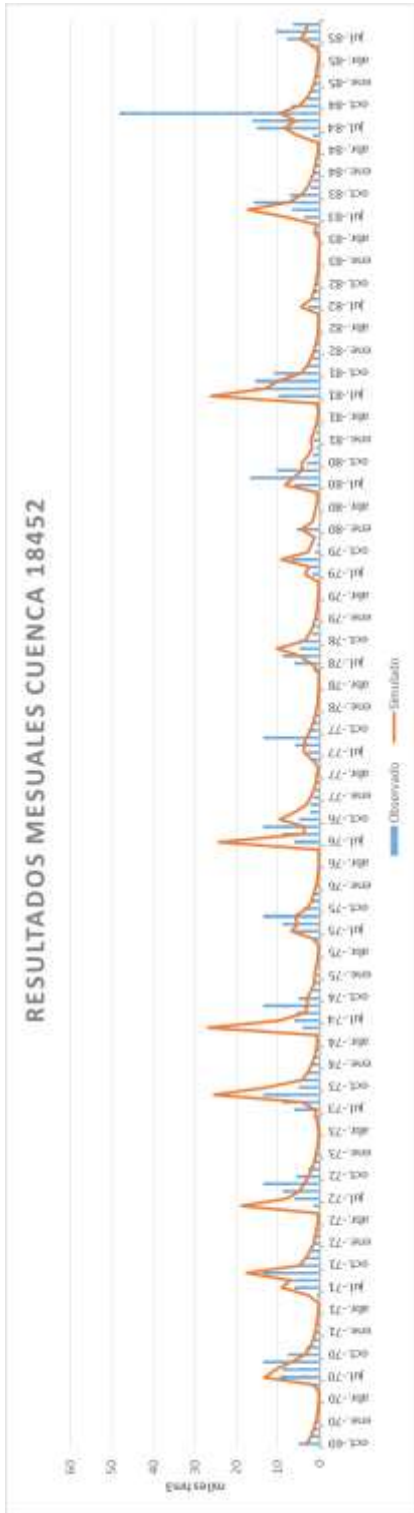
La cuenca que tiene mayor influencia en la zona de estudio es la cuenca 18494 (gráfica 14) y se puede apreciar la similitud de la gráfica comparativa ente valores observados y simulados.



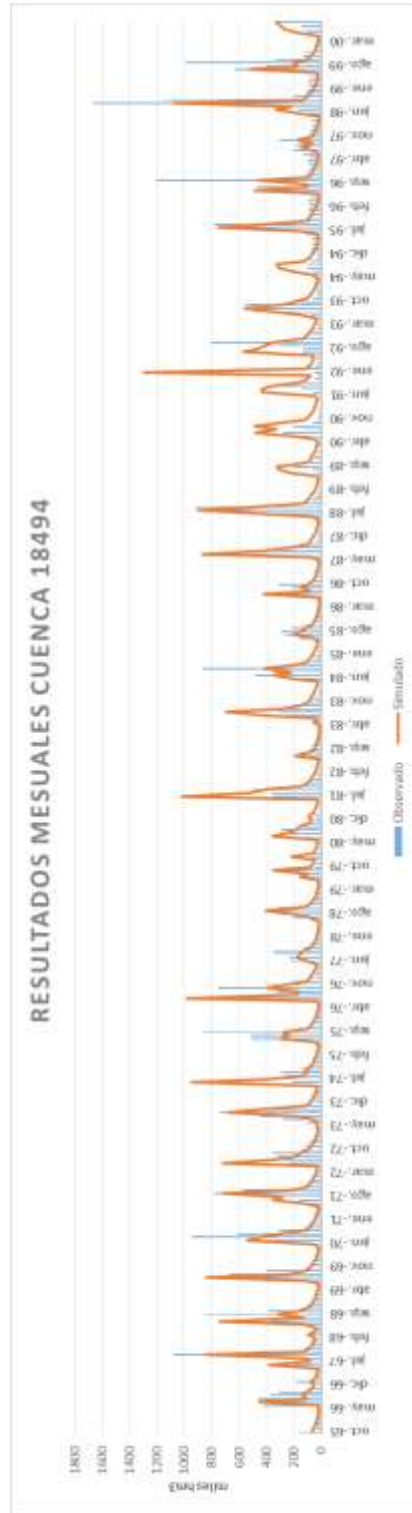
Gráfica 12. Resultados Mensuales de escurrimiento de la simulación en EvalHid de la cuenca 18201.



Gráfica 11. Resultados Mensuales de escurrimiento de la simulación en EvalHid de la cuenca 18202.



Gráfica 13. Resultados Mensuales de escurrimiento de la simulación en EvalHid de la cuenca 18452.



Gráfica 14. Resultados Mensuales de escurrimiento de la simulación en EvalHid de la cuenca 18494.

Es elemental recalcar que las eficiencias de Nash-Sutcliffe son buenas, ya que se encuentran por encima de 0.6; por lo que se muestran en el rango de satisfactorias, buenas y muy buenas.

Tabla 19. Influencia de las cuencas de simulación en el acuífero Apatzingán.

Cuenca	Aportación
18201	100%
18202	71.41%
18452	100%
18494	43.70%

Para la modelación subterránea se utilizan las infiltraciones de las cuencas simuladas con EvalHid; cabe destacar que, por parte de las cuencas 18202 y 18494 se considera solo un porcentaje de aportación, que se expresa en la tabla 19.

5.3.4 BALANCE HÍDRICO

En las tablas 20 y 21 se muestran los valores anuales en la serie en estudio, así como los valores medios del balance hídrico, donde la relación que existe entre los resultados de precipitación son congruentes respecto a los de infiltración y escurrimiento.

Tabla 20. Valores anuales del balance hídrico en el periodo 1994 – 2007.

	Precipitación (mm)	ETP (mm)	Escurrimiento (mm)	Infiltración (mm)
1994	492.1	432.0	20.4	41.0
1995	700.4	548.6	75.6	76.2
1996	639.9	516.6	54.9	68.3
1997	467.4	425.6	9.6	32.4
1998	776.4	588.6	96.1	90.8
1999	544.1	454.0	37.5	53.0
2000	647.4	556.8	28.8	60.0
2001	679.9	564.6	46.5	66.3
2002	809.1	647.4	71.7	86.2
2003	794.5	629.4	75.1	95.3
2004	902.6	714.0	88.6	98.4
2005	536.1	453.5	35.2	50.0
2006	772.6	631.4	55.0	82.5
2007	806.2	630.3	82.6	87.9

Tabla 21. Valores medios del balance hídrico.

Precipitación (mm)	ETP (mm)	Escorrimiento (mm)	Infiltración (mm)
683.5	556.6	55.5	70.6

De manera gráfica, en la figura 50 se muestra un diagrama del balance hídrico realizado para el acuífero Apatzingán.

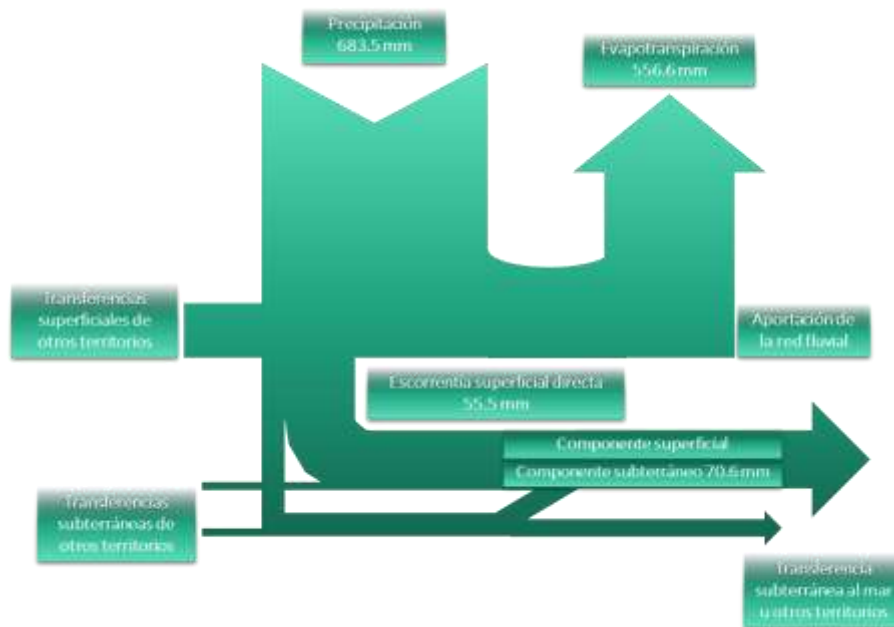


Figura 50. Diagrama del balance hídrico.

A continuación, dependiendo de la geología (figura 55), se obtienen los coeficientes de conductividad (X, Y) y almacenamiento de la zona en estudio. Para este caso, se

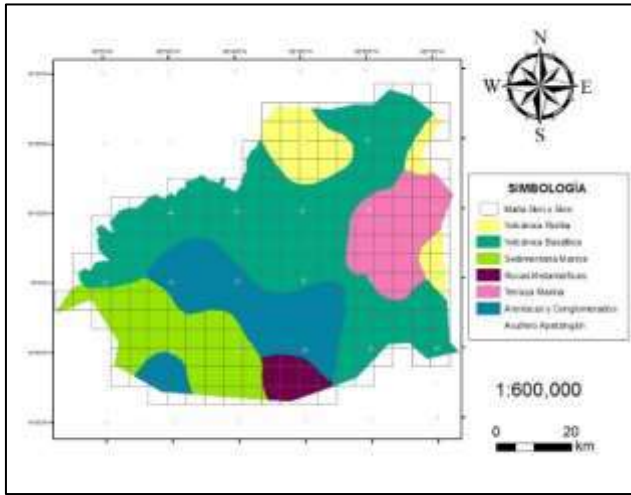


Figura 55. Hidrogeología de la zona en estudio en función de la malla que discretiza el acuífero.

considera que los valores de conductividad hidráulica en el sentido Y serán los mismos que en el sentido X, lo que implica que no existe un sentido de flujo subterráneo principal. A razón de que se tienen 6 geologías diferentes, se proponen 6 zonas dentro del acuífero, donde los rangos se presentan en la tabla 22, a su vez, los valores que se utilizaron para el acuífero se muestran en la figura 56, el

cual corresponde a un valor medio entre el valor mínimo y el medio para cada geología.

Tabla 22. Rango de valores del coeficiente de conductividad hidráulica.

Coeficiente de conductividad hidráulica		min	med	max
1	Volcanica basáltica andesítica cenozoico	3.3	165.65	328
2	Sedimentaria marina arcillosa, caliza arcillosa	33	1658	3283
3	Volcanica riolita	0.164	16.582	33
4	Terraza marina grava, arena, limos	33	1658	3283
5	Areniscas y conglomerados	99	542	985
6	Rocas metamórficas	0.164	16.582	33

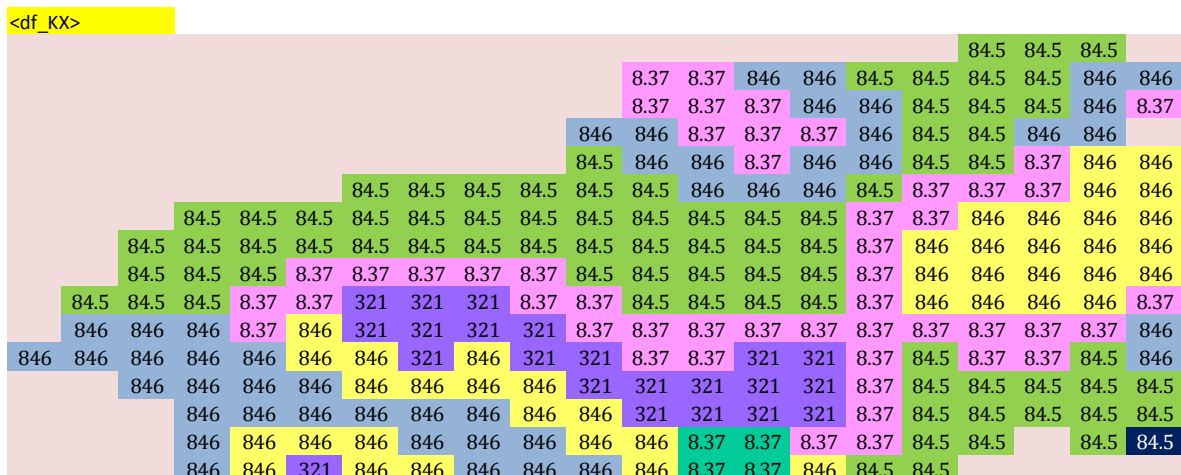


Figura 56. Matriz de valores del coeficiente de conductividad hidráulica.

Tabla 24. Acciones elementales en la zona de estudio.

ACCIONES ELEMENTALES	
1	Recarga por riego.
2	Extracciones agrícolas fuera del distrito de riego.
3	Extracciones en el módulo 2 del distrito de riego.
4	Extracciones en el módulo 3 del distrito de riego.
5	Extracciones en el módulo 5 del distrito de riego.
6	Extracciones en el módulo 5B del distrito de riego.
7	Extracciones en el módulo 6 del distrito de riego.
8	Extracciones en el módulo 7 del distrito de riego.
9	Extracciones en el módulo 8 del distrito de riego.
10	Extracciones en el módulo 9 del distrito de riego.
11	Extracciones en el módulo 10 del distrito de riego.
12	Extracciones en el módulo 11 del distrito de riego.
13	Extracciones en el módulo 12 del distrito de riego.
14	Extracciones urbanas dentro de las localidades.
15	Extracciones urbanas fuera de las localidades.
16	Recarga por lluvia perteneciente a la cuenca de la EH 18494.
17	Recarga por lluvia perteneciente a la cuenca de la EH 18202.
18	Recarga por lluvia perteneciente a la cuenca de la EH 18201.
19	Recarga por lluvia perteneciente a la cuenca de la EH 18452.

En la tabla 24, se muestran las acciones elementales con las que se cuentan, así como el nombre de las mismas; la parte más importante es la distribución ponderada de las mismas dentro de la zona de estudio.

Para la distribución ponderada, es necesario saber las acciones elementales que se presentan en cada celda; la importancia radica en el volumen, ya que en los pozos de extracción, éste es el parámetro de mayor peso.

Tabla 25. Extracciones en la zona.

Agrícola fuera del Modulo	1
Modulo 2	2
Modulo 3	3
Modulo 5	4
Modulo 5B	5
Modulo 6	6
Modulo 7	7
Modulo 8	8
Modulo 9	9
Modulo 10	10
Modulo 11	11
Modulo 12	12
Urbano Localidades	13
Urbano fuera de Localidades	14

Si bien se tienen distintas extracciones para una misma celda del acuífero, para poder representarlo a forma de mapa, se toma la más importante. En la zona en estudio existen 14 tipos de extracciones (mostrados en la tabla 25); su distribución dentro del acuífero se puede observar en la figura 58.

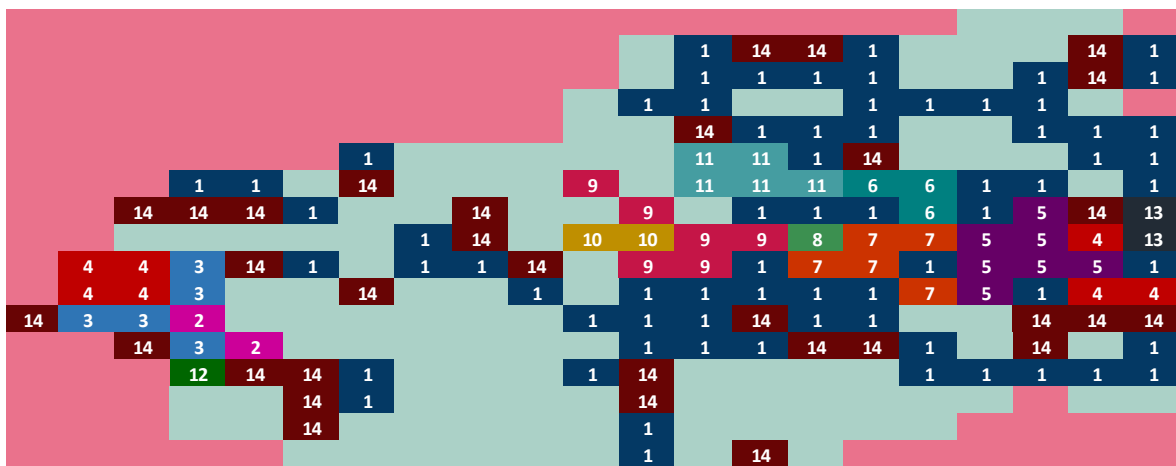


Figura 58. Localización de las extracciones en el acuífero Apatzingán.

Tabla 26. Recargas en la zona.

Recarga por Riego	1
Recarga por Lluvia cuenca 18494	2
Recarga por Lluvia cuenca 18202	3
Recarga por Lluvia cuenca 18201	4
Recarga por Lluvia cuenca 18452	5

De la misma forma, existen 5 diferentes tipos de recarga, que se muestran en al tabla 26: se tiene una por el riego que tiene mayor impacto en la zona donde se ubica el distrito de riego, así como las recargas por lluvia en las distintas subcuencas de simulación superficial; en la figura 59 se muestra la distribución de dichas recargas.

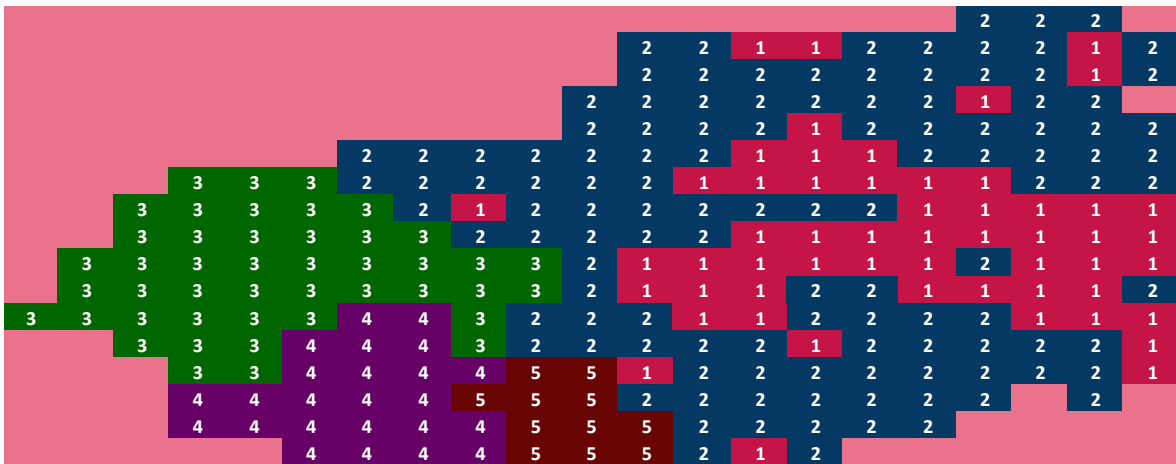


Figura 59. Localización de las recargas en el acuífero.

Para los parámetros de control, se tienen 3 manantiales con gastos aforados y 9 niveles en celdas distribuidas en el acuífero con el fin de observar el comportamiento que éstas tienen en el transcurso del tiempo; dichos parámetros deben definirse con sus celdas correspondientes, que se representan en la figura 60.

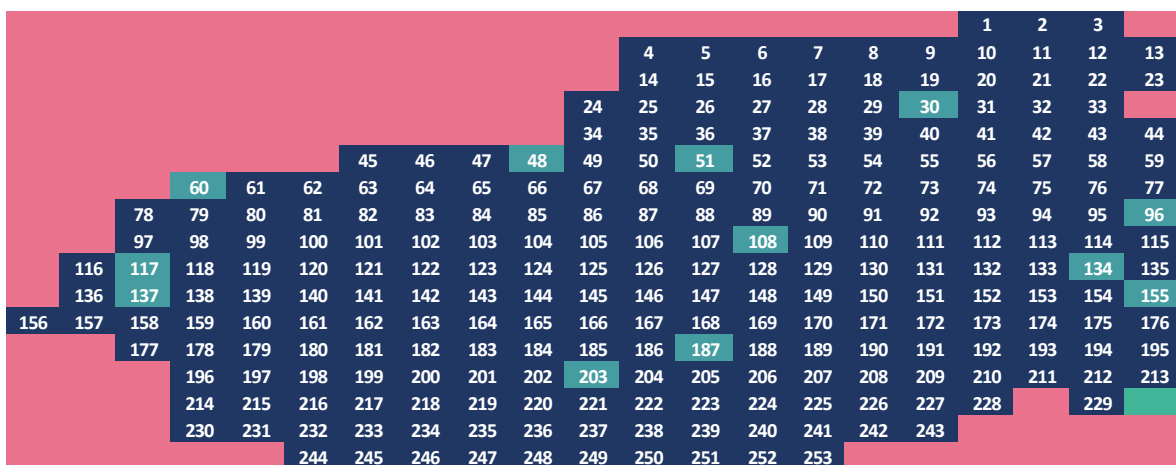
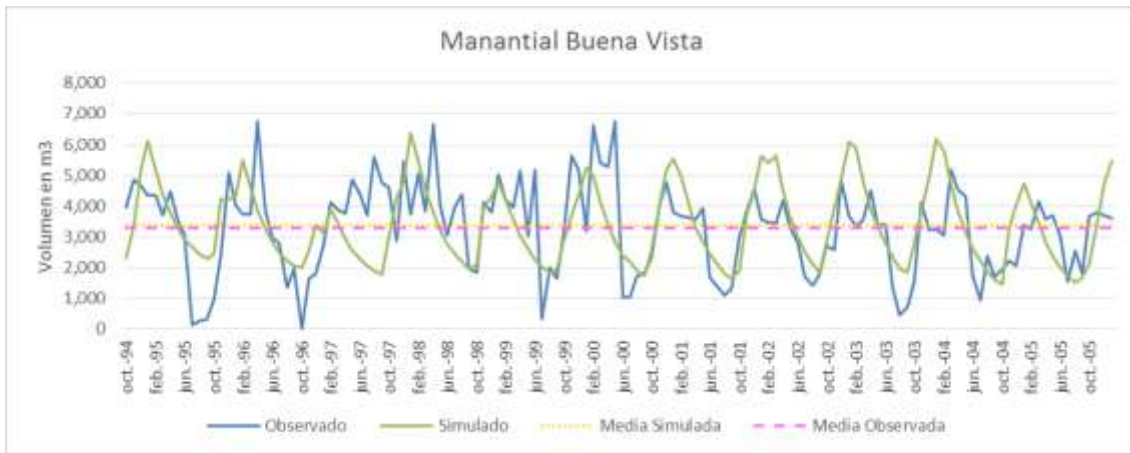
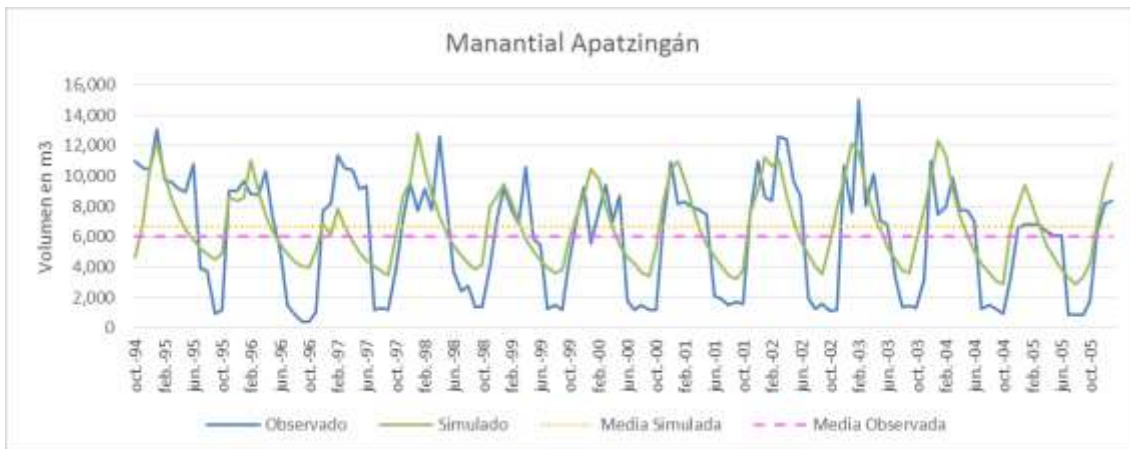


Figura 60. Localización de las celdas en las cuales se obtendrán parámetros de control.



Gráfica 15. Resultados de la modelación, comparados con los observados en el manantial Buena Vista.



Gráfica 16. Resultados de la modelación, comparados con los observados en el manantial Buena Vista.

Tabla 27. Cuadro comparativo entre los valores observados y simulados en los manantiales Buena Vista y Apatzingán.

Manantial	Coefficiente de Correlación	Media Simulada (m ³)	Media Observada (m ³)	Variación respecto a medias
Buena Vista	-0.59	3394.24	3275.17	3.3%
Apatzingán	-0.70	6680.70	6011.53	10.0%

Las medias en los volúmenes entre los valores simulados con el software Aquival y los observados varían en 3.5% para el manantial Buena Vista y en 11.2% para el manantial Apatzingán, además la correlación es mayor a 0.5, que se presentan en la tabla 27.

6 CONCLUSIONES

GESTIÓN DE DATOS

La información con la que se cuenta para realizar estudios de simulación hidrológica (superficial y subterránea) en la zona de estudio es bastante escasa e imprecisa; por ello calibrar modelos de simulación hidrológica se vuelve más complejo, en parte debido a la gestión de datos que debe realizarse sobre la escasa información que se conoce o se cuenta.

El correcto tratamiento de los datos de entrada es indispensable; de no realizarse, es posible que se obtenga una discrepancia muy alta en los datos de modelación. Este proceso se vuelve aún más complicado al no contar con datos fidedignos, por lo que una de las partes más importantes de la simulación hidrológica consiste en la validación de los datos registrados en las estaciones hidrológicas, las cuales son usadas para alimentar a los modelos de simulación.

En el caso del llenado de estaciones, se vuelve útil y sencillo el uso de matrices de correlación, así como calificar a las mismas, de tal modo que se jerarquicen aquellas estaciones que pueden aportar más y mejores datos respecto de otras. El mejor método para el llenado de estaciones resultó ser el IDC (inverso de la distancia al cuadrado), ya que toma en cuenta la distancia euclidiana de una estación meteorológica frente a otra, otorgando así una mejor precisión en el método.

SIMULACIÓN SUPERFICIAL

Los distintos escenarios de gestión a modelar y sus componentes condicionarán el tipo de modelo superficial a utilizar (de tipo semi-distribuidos o unicelulares), debiendo ajustar sus parámetros en la calibración de valores observados y simulados.

Para la zona en estudio (y bajo el principio de parsimonia), se optó por la utilización del modelo de Témez. Así mismo, el modelo fue distribuido en microcuencas; razón por la cual se crearon un total de 44 microcuencas para las 4 cuencas de simulación generadas en la zona de estudio.

Como resultado de la infiltración en la zona, se obtuvo un valor bastante alto, esto debido al coeficiente de infiltración C con el que se calibró el modelo Témez. De no haber utilizado tal valor para el coeficiente, los volúmenes simulados (comparados con los observados) no hubiesen tenido correlación.

SIMULACIÓN SUBTERRÁNEA

El tamaño de celdas que se utilizó para la simulación subterránea (5km x 5km) permitió que grupos de pozos quedaran mejor distribuidos en las celdas activas de modelo.

La modelación con Aquival se realizó con conductividades hidráulicas, lo que permite la modificación de los espesores en el acuífero. Al hacer esto, se obtienen volúmenes con mayor semejanza a los observados a lo largo del periodo de simulación en los manantiales; esto debido a que son 2 parámetros independientes y por ello su alteración es menos compleja.

Se utilizaron distintos escenarios para la modelación en Aquival, lo que mejor resultó fue la implementación de conductividades hidráulicas. Las transmisividades no daban los resultados deseados, ya que no podían ser modificados tan fácilmente debido a que dependen directamente del espesor del acuífero.

Para la presentación de los resultados de las series de descarga por manantial de la modelación subterránea con el software Aquival, se realizó un desfase de 5 meses, esto debido a la precalentamiento que necesita el software para lograr resultados congruentes. A partir del mes 5 los resultados se comportan con una tendencia adecuada, por lo que se

considera el inicio de un correcto funcionamiento del modelo, permitiendo la calibración del modelo.

Para obtener la recarga de lluvia en cada una de las cuencas superficiales, el 100% de la recarga en la zona representa el 5% de la infiltración total, esto debido a que el coeficiente de infiltración fue muy bajo. Además, la tendencia obtenida en los escurrimientos fue la deseada; sin embargo, se tuvo que compensar con los escurrimientos; es decir que se realizó una modificación del balance.

CONCLUSIONES GENERALES

Tanto para el modelo superficial como para el subterráneo, es imperativo recalcar que el modelo a utilizar depende de la zona en estudio y de la información con la que se cuenta, principalmente los parámetros necesarios para las calibraciones pertinentes.

El uso de un modelo de flujo subterráneo permite conocer el comportamiento de acuífero de manera general, con los que se pueden ubicar abatimientos locales para poder tomar las medidas pertinentes. Conocer el comportamiento de los niveles también podría permitir el generar redes de monitoreo para estudiar el comportamiento del acuífero y conducir a un racional aprovechamiento de los recursos existentes, manteniendo un volumen adecuado para salvaguardar la explotación sustentable del acuífero en estudio y no llevarlo a condiciones de veda.

7 RECOMENDACIONES

Tomando en cuenta que no se tiene la información espacial necesaria ni actualizada, es imperativo la realización de estudios periódicos, de tal forma que se conozca el estado actual del acuífero en cuestión, para así, poder realizar las medidas necesarias para su cuidado y mantenimiento, evitando así los conos de abatimiento y la posible sobreexplotación futura.

El monitoreo adecuado para las estaciones tanto hidrométricas como meteorológicas se vuelve completamente necesario ante la necesidad de conocer la procedencia de datos; esto nos da una ventaja al momento de realizar los estudios y las modelaciones, ya que en cualquier momento podemos revisar los datos.

Es imperativo tener un registro más completo de datos para poder trabajar; al no tener que realizar modificaciones en las series de datos (como es el llenado de estaciones), no tendremos que estar arrastrando un error que puede convertirse en una alteración significativa en algún proceso de la modelación.

En la zona de estudio se tiene un conocimiento vago acerca de los pozos de extracción clandestinos, por lo que es importante ubicar dichos pozos y tomar las medidas pertinentes frente a ellos. Estos volúmenes extraídos que no han sido contabilizados han podido afectar las modelaciones.

REFERENCIAS

- Aparicio-Mijares, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México: Editorial Limusa.
- AQUIVAL. (2012). *Módulo para el preproceso y simulación de acuíferos. Manual de Usuario*. Valencia, España : Universidad Politécnica de Valencia .
- Arreguín-Cortés, F. I. (2011). *El Agua Subterránea en México*. Mexico, D.F.: SEMARNAT.
- BANDAS. (2016). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales*. Obtenido de Conagua: <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/portada%20bandas.htm>
- Burnash , R. J., Ferral, R. L., & McGuire, R. A. (1973). A generalized streamflow simulation system, conceptual modeling for digital computers.
- Casas-Mas, A., & Paredes-Arquiola, J. (2013). *Evaluación del recurso hídrico en al cuenca del río Turia (España) mediante la aplicación de modelos semiagregados de Precipitación-Escorrentía*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia .
- CICESE. (Septiembre de 2015). *CLICOM*. Obtenido de Base de Datos Climatológica Nacional: <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>
- CONABIO. (2016). *Comisión Nacional para el Conocimiento y el Uso de la Biodiversidad*. Obtenido de Geoportal del Sistema Nacional de Información Sobre Biodiversidad : <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAGUA. (2009). *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea del Acuífero (1620) Apatzingán, Estado de Michoacán*. Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA. (10 de Junio de 2016). *Situación de los Recursos Hídricos*. Obtenido de Aguas Subterráneas: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/situacion-de-los-recursos-hidricos>

- Dölling, O. (2001). *Sistemas de apoyo a la Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas*. Santiago, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *View issue TOC*, 1015-1031.
- Fallas, J. (2007). *Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicación*.
- Felicísimo, A. M. (1994). *Modelos Digitales del Terreno: Introducción y aplicación de las ciencias ambientales*.
- Gómez-Fuentes, M. (2013). *Notas del Curso Bases de Datos*. México, D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Cuajimalpa.
- Gómez-Ruiz , E., Maldonado-Martínez, B., & Montalvo-Mata, V. (2011). *Distrito de Riego 097 "Lázaro Cárdenas"*. México: Univerdidad Autónoma de Chapingo.
- Hernández-Hernández , M. A., Solera-Solera, A., Nowak, W., & Andreu, J. (2014). *Reducción de incertidumbre en la parametrización de modelos hidrológicos usados para la gestión conjunta de recursos hídricos*. Santiago, Chile: Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
- Hernández-Hernández, M. A., Amador-García , A., Sánchez-Quispe , S. T., & Solera-Solera, A. (2014). Manejo conjunto del agua en la subcuenca Tábula - Picachos, Guanajuato, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 159-165.
- IMTA. (10 de enero de 2017). *IMTA*. Obtenido de Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: <https://www.imta.gob.mx>
- INEGI. (2004). *Guía para la Interpretación de Cartografía Edafología*. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2014). *SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA*. México: INEGI.

- INEGI. (10 de enero de 2017). *INEGI*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática: <http://www.beta.inegi.org.mx/inegi.html>
- Manual de Usuario AQUIVAL 2. (Julio de 2012). *Módulos de Cálculo en la Simulación de Acuíferos por el Método de Autovalores*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Merlos-Villegas, F., Sánchez-Quispe, S. T., & Almanza-Campos, J. A. (2014). *Creación de un Sistema de Información Hidrológico para el Cálculo de intensidades Máximas y Gestión de Datos Meteorológicos*. Jalisco, México: XXIII Congreso Nacional de Hidráulica.
- Navarro-Avargonzález, A. (12 de enero de 2017). *Conceptos Básicos de Hidrología*. Obtenido de Instituto Geominero de España: http://aguas.igme.es/igme/publica/pdfjor_aguas_mine/1_conceptos.pdf
- Paredes-Arquiola, J., Solera-Solera, A., Andreu-Álvarez, J., & Lerma-Elvira, N. (18 de Noviembre de 2014). Herramienta EvalHid para la Evaluación de Recursos Hídricos. *Manual Técnico v1.1*. Valencia, España: U.P.V.
- Pérez-Sánchez, J. (2013). *Gestión conjunta de recursos hídricos a escala local. Aplicación del modelo Simges al caso de Hellín (Albacete)*. Murcia: Universidad de Murcia.
- Pérez-Sánchez, J., & Senet-Aparicio, J. (2015). Integrated water resources management on a local scale: a challenge for the user community - a case study in Southern Spain. *Environ Earth Sci*, 6097-6109.
- Pizarro T., R., Ramirez B., C., & Flores V., J. (2003). *Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en periodos extremos*. Chile.
- Puerta-Tuesta, R., Rengifo-Trigozo, J., & Bravo-Morales, N. (2011). *ArcGis Básico 10*. Tingo María, Perú: Universidad Nacional Agraria de la Selva.

- REPDA. (15 de julio de 2015). *REPDA*. Obtenido de CONAGUA:
<http://app.conagua.gob.mx/repda.aspx>
- REPDA. (10 de enero de 2017). *REPDA*. Obtenido de Registro Público de Derechos de Agua:
<https://www.gob.mx/conagua/>
- ReviverSoft. (20 de enero de 2017). *ReviverSoft*. Obtenido de .INP Extensión del archivo:
<http://www.reviversoft.com/es/file-extensions/inp>
- Riccardi, G. (1997). *La transformación lluvia-caudal en ambientes rurales y urbanos. Los procesos hidrológicos y el modelado*. Rosario, Argentina : Cuadernos de Curiham.
- Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V., & Lane, W. L. (1980). *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*. Colorado: Water Resources Publications.
- Sechi, G., & Sulis, A. (2010). *Intercomparison of Generic Simulation Models for Water Resource Systems*. Ottawa: International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment's Sake.
- Temez, J. R. (1977). *Modelo Matemático de transformación "precipitación-escorrentía"*. Madrid : Asociación de Investigación Industrial Eléctrica.
- UPV, U. (20 de enero de 2017). *Descargas Aquatool*. Obtenido de EvalHid y Caudeco:
https://www.upv.es/aquatool/es/descargas_es.html

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de Cálculo del software EvalHid.	32
Figura 2. Modelo de Cálculo del modelo hidrológico del modelo Témez.	34
Figura 3. Esquema de flujos y almacenamiento del modelo de Témez.	36
Figura 4. Transformación de precipitación en excedente.	37
Figura 5. Producción de escorrentía subterránea.	40
Figura 6. Ventana Principal del programa Evalhid.	45
Figura 7. Pestaña para crear un Nuevo Proyecto.	45
Figura 8. Ventana Nuevo Proyecto.	45
Figura 9. Localización del botón GIS.	45
Figura 10. Ventana GIS; agregar un shape.	46
Figura 11. Ventana GIS; cuenca y punto de salida agregados.	46
Figura 12. Ventana GIS, ubicación de botones para agregar la cuenca y el punto de salida al modelo.	46
Figura 13. Ventana que contiene la información de la subcuenca.	47
Figura 14. Ventana que contiene la información del punto de salida.	47
Figura 15. Ubicación del botón subcuencas en el apartado información.	47
Figura 16. Ventana para editar la información de las subcuencas, pestaña general.	47
Figura 17. Ventana para editar la información de las subcuencas, pestaña parámetros de Témez.	48
Figura 18. Ubicación de los botones subcuencas y parámetro.	48
Figura 19. Tabla de resumen de la información de las subcuencas.	48
Figura 20. Tabla de resumen de los parámetros.	48
Figura 21. Edición del periodo de simulación para la modelación.	49
Figura 22. Botones para poder realizar la modelación.	49
Figura 23. Ventana del eje de abcisas; para obtener la gráfica de resultados.	49
Figura 24. Ventana para la representación gráfica de los resultados en EvalHid.	50

Figura 25. Ubicación de la aplicación en la carpeta de trabajo..... 52

Figura 26. Ubicación del botón Nuevo Modelo..... 52

Figura 27. Concatenación de los parámetros óptimos..... 52

Figura 28. Ubicación de las series de resultados provenientes de EvalHid..... 53

Figura 29. Ubicación de las series observados y simulados. 53

Figura 30. Ubicación de los indicadores de ajuste. 53

Figura 31. Ubicación del botón para iniciar la simulación, así como los parámetros óptimos..... 54

Figura 32. Macrolocalización del acuífero Apatzingán. Elaboración propia. 65

Figura 33. Macrolocalización del acuífero Apatzingán a nivel estatal. Elaboración propia..... 65

Figura 34. Modelo digital de elevaciones del acuífero Apatzingán. Elaboración propia..... 66

Figura 35. Influencia del acuífero Apatzingán en los municipios aledaños. Elaboración propia..... 66

Figura 36. Distribución de los acuíferos en México. Elaboración propia. 66

Figura 37. Distrito de Riego 097 “Lázaro Cárdenas” dentro del acuífero Apatzingán. Elaboración propia..... 67

Figura 38. Localización hidrológica del acuífero Apatzingán. Elaboración propia. .. 67

Figura 39. Tipo de suelo existente en la zona de estudio. Elaboración propia. 68

Figura 40. Uso de suelo en dentro del acuífero Apatzingán. Elaboración propia. 69

Figura 41. Mapa geológico del acuífero Apatzingán. Elaboración propia..... 69

Figura 42. Concesiones otorgadas por el REPDA en el acuífero Apatzingán. Elaboración propia..... 70

Figura 43. Mapa de cruce de concesiones otorgadas por el REPDA y el distrito de riego 097. Elaboración propia. 70

Figura 44. Estaciones hidrométricas utilizadas para la generación de cuencas. Elaboración propia..... 71

Figura 45. Cuencas de simulación generadas con las estaciones hidrométricas.
Elaboración propia..... 71

Figura 46. Estaciones meteorológicas a utilizar para el estudio hidrológico.
Elaboración propia..... 72

Figura 47. Polígonos de Thiessen realizados a partir de las estaciones meteorológicas en la zona de estudio. Elaboración propia. 72

Figura 48. Microcuencas generadas a partir de las cuencas de simulación.
Elaboración propia..... 73

Figura 49. Influencia de los polígonos de Thiessen sobre las microcuencas.
Elaboración propia..... 73

Figura 50. Diagrama del balance hídrico. 85

Figura 51. Discretización del acuífero Apatzingán en 254 celdas de 25 km² (5km x 5km). 86

Figura 52. Numeración de las celdas en las que se discretiza el acuífero..... 86

Figura 53. Matriz de espesor del acuífero. 87

Figura 54. Matriz de asignación de valores en la zona del acuífero..... 87

Figura 55. Hidrogeología de la zona en estudio en función de la malla que discretiza el acuífero. 88

Figura 56. Matriz de valores del coeficiente de conductividad hidráulica..... 88

Figura 57. Matriz de valores del coeficiente de almacenamiento. 89

Figura 58. Localización de las extracciones en el acuífero Apatzingán. 90

Figura 59. Localización de las recargas en el acuífero..... 91

Figura 60. Localización de las celdas en las cuales se obtendrán parámetros de control. 91

Figura 61. Matriz del nivel inicial en la zona de estudio..... 92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Influencia del acuífero en los municipios (CONAGUA, 2009).	2
Tabla 2. Habitantes en la zona de estudio.(CONAGUA, 2009)	2
Tabla 3. Concesiones dentro del acuífero Apatzingán. (REPDA, 2013)	7
Tabla 4. Tabla que relaciona el número de datos con el número de cambios permitidos para el test de secuencias.	23
Tabla 5. Rango de valores en los parámetros del modelo de Témez.....	42
Tabla 6. Valor del parámetro de humedad máxima en función del uso de suelo. ..	43
Tabla 7. Valor del parámetro de infiltración máxima en función del tipo de suelo.	43
Tabla 8. Calidad de ajuste del coeficiente Nash-Sutcliffe.....	55
Tabla 9. Calidad de ajuste del coeficiente Nash-Sutcliffe modificado.	56
Tabla 10. Calidad de ajuste del coeficiente de correlación de Pearson.	57
Tabla 11. Usos de suelo en la zona de estudio.	69
Tabla 12. Resumen de la estación meteorológica 16007.	74
Tabla 13. Matriz de correlación entre estaciones meteorológicas.	75
Tabla 14. Compilación de información y resultado de la validación de datos en las estaciones meteorológicas.	76
Tabla 15. Parámetros, eficiencia y variación de resultados en la cuenca 18201.	77
Tabla 16. Parámetros, eficiencia y variación de resultados en la cuenca 18202.	77
Tabla 17. Parámetros, eficiencia y variación de resultados en la cuenca 18452.	78
Tabla 18. Parámetros, eficiencia y variación de resultados en la cuenca 18494.	78
Tabla 19. Influencia de las cuencas de simulación en el acuífero Apatzingán.	84
Tabla 20. Valores anuales del balance hídrico en el periodo 1994 – 2007.	84
Tabla 21. Valores medios del balance hídrico.	85
Tabla 22. Rango de valores del coeficiente de conductividad hidráulica.	88
Tabla 23. Rango de valores del coeficiente de almacenamiento hidráulico.....	89
Tabla 24. Acciones elementales en la zona de estudio.	90
Tabla 25. Extracciones en la zona.	90

Tabla 26. Recargas en la zona.....	91
Tabla 27. Cuadro comparativo entre los valores observados y simulados en los manantiales Buena Vista y Apatzingán.	93

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Resultado de los límites de Anderson para la estación 16007.	74
Gráfica 2. Promedios mensuales para la estación Apatzingán 16007, comparativa entre datos con vacíos y llenos.	75
Gráfica 3. Resultados anuales de los escurrimientos en EvalHid en la cuenca 18201.	77
Gráfica 4. Resultados anuales de los escurrimientos en EvalHid en la cuenca 18202.	77
Gráfica 5. Resultados anuales de los escurrimientos en EvalHid en la cuenca 18452.	78
Gráfica 6. Resultados anuales de los escurrimientos en EvalHid en la cuenca 18494.	78
Gráfica 7. Resultados medios de los escurrimientos mensuales de EvalHid en la cuenca 18201.....	79
Gráfica 8. Resultados medios de los escurrimientos mensuales de EvalHid en la cuenca 18202.....	79
Gráfica 9. Resultados medios de los escurrimientos mensuales de EvalHid en la cuenca 18452.....	80
Gráfica 10. Resultados medios de los escurrimientos mensuales de EvalHid en la cuenca 18494.....	80
Gráfica 11. Resultados Mensuales de escurrimiento de la simulación en EvalHid de la cuenca 18202.....	82
Gráfica 12. Resultados Mensuales de escurrimiento de la simulación en EvalHid de la cuenca 18201.....	82
Gráfica 13. Resultados Mensuales de escurrimiento de la simulación en EvalHid de la cuenca 18452.....	83
Gráfica 14. Resultados Mensuales de escurrimiento de la simulación en EvalHid de la cuenca 18494.....	83

Gráfica 15. Resultados de la modelación, comparados con los observados en el manantial Buena Vista.....93

Gráfica 16. *Resultados de la modelación, comparados con los observados en el manantial Buena Vista.*93