

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

“EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LOS ACUÍFEROS ZAMORA Y COTIJA”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA CIVIL

Maria Guadalupe Manzo Oseguera

ASESORA DE TESIS

Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe
Doctora en Ingeniería de Canales y Puertos

CO-ASESORA DE TESIS

Dra. Liliana García Romero
Doctora en Ingeniería del Agua y
Medioambiental



Morelia Michoacán, agosto 2022

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Doy principalmente las gracias a Dios, por poder permitirme llegar hasta este momento importante de mi vida, el poder concluir mis estudios, gracias por estar en todo momento conmigo ayudándome a aprender de mis errores y a no cometerlos otra vez, gracias por haberme dado la paciencia y toda la fuerza necesaria para continuar en todo momento, eres tú quien guía el destino de mi vida.

A mis padres

Alfredo Manzo y Ma. del Refugio Oseguera.

Gracias por ser los pilares más importantes en mi vida, por demostrarme en todo momento su apoyo incondicional, por sus consejos y valores enseñados en mi persona, por el valor mostrado para salir adelante, por brindarme el sustento día a día a pesar de lo cansado que se puede mostrar el camino, gracias por permitirme lograr alcanzar este sueño de ser una profesional, pero más que nada gracias por su amor, juntos me han educado, me han proporcionado cada cosa que he necesitado, sus enseñanzas las aplico a diario, los amo con todo mi corazón y agradezco estén conmigo en este momento tan especial.

A la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe

Por ser una excelente profesora y llevarme por el camino de la investigación, gracias por siempre apoyarme y preocuparse por mi desarrollo académico, por sus consejos, su apoyo y motivación mostrada a lo largo de este proceso, muchas gracias por los conocimientos brindados y por provocarme el gusto por esta área de la ingeniería que es la hidráulica.

A la Dra. Liliana García Romero

Por transmitirme sus conocimientos de la manera más amable y atenta, gracias por su apoyo, paciencia y tiempo, gracias por siempre estar ahí para resolverme todas mis dudas y poder llevar a cabo mi tesis de la mejor manera.

Al Dr. Guillermo Martínez Ruiz

Por ser mi tutor desde el quinto semestre de la licenciatura, agradezco el que haya estado para mí en un momento muy difícil dentro de la facultad, gracias por su tiempo y apoyo en cada momento y con cualquier dificultad.

A M.C. María del Mar Navarro Farfán

Gracias por su tiempo, paciencia y por brindarme sus conocimientos a lo largo de este proyecto.

A mis profesores

Gracias por todos los conocimientos brindados para alcanzar mi formación como ingeniera civil, agradezco a los profesores Martín Sánchez, Heriberto Arias, Nelio Pastor, Rafael Soto, José Carlos Rubio, Constantino Domínguez, Jorge Ruíz, Tatjana Vukasinac, Eleazar Arreygue, Benjamín Lara y especialmente Guillermo Pérez, por demostrar el amor hacia su profesión y que tiene un gran corazón.

A la Facultad de Ingeniería Civil y a la UMSNH

Por brindarme la formación a lo largo de estos 5 años y darme la oportunidad al abrirme las puertas para dar este paso importante en mi vida.

A mis amigos

Lizeth Pérez, David Gutiérrez, Rivelino Magaña, Lupita Torres, Julio Cardiel, Heriberto García, compañeros de la sección 02 y amigos del laboratorio de hidráulica con los que compartí esta etapa tan bonita, también gracias a todos los que no están aquí, pero me ayudaron y apoyaron a que este gran esfuerzo se volviera realidad.

RESUMEN

La evaluación de los recursos hídricos es una parte fundamental para la determinación de disponibilidad hídrica de una región y es de vital importancia para poder realizar una correcta gestión del recurso hídrico. El agua tiene diversos usos, a diario utilizamos grandes cantidades de agua para propósitos diferentes, uno de los más importantes el del consumo humano, y que no sólo se utiliza para propósitos domésticos sino también en muchas otras actividades, principalmente en la agricultura donde se consume alrededor del 76% del volumen total disponible (CONAGUA, 2018).

Tener un conocimiento certero a cerca de la disponibilidad de los recursos hídricos y cómo se gestiona éste dentro de los sistemas subterráneos en México, actualmente representa un reto debido a la falta de información y al mal manejo de la misma para poder representar el funcionamiento de los sistemas a través de modelos matemáticos, ya que éstos nos pueden ayudar a tener un conocimiento acercado del funcionamiento de cualquier sistema subterráneo para poder aprovechar el recurso hídrico presente en el acuífero (Pérez, 2021).

Esta investigación busca realizar una modelación hidrológica a través de un modelo precipitación-escorrentía, para obtener el balance hídrico de los acuíferos y evaluar el recurso de la zona; además de generar las series de recarga del área de estudio y a través de la modelación hidrológica, poder simular la información no existente en el acuífero de Cotija. Para lograrlo será necesario llevar a cabo la caracterización del acuífero reuniendo todas las condiciones físicas a las que está sujeto como; relieve, geología, extracciones, etc.

Palabras clave: Modelación hidrológica, Modelo de Témez, Acuíferos Zamora y Cotija, Caracterización, Evalhid, Modflow.

ABSTRACT

The evaluation of water resources is a fundamental part for determining the water availability of a region and is of vital importance to be able to carry out a correct management of water resources. Water has various uses, every day we use large amounts of water for different purposes, one of the most important being human consumption, and it is not only used for domestic purposes but also in many other activities, mainly in agriculture where it is consumed around 76% of the total volume available (CONAGUA, 2018).

Having an accurate knowledge about the availability of water resources and how it is managed within the underground systems in Mexico, currently represents a challenge due to the lack of information and the mishandling of it in order to represent the functioning of the systems. systems through mathematical models, since these can help us to have an approximate knowledge of the operation of any underground system in order to take advantage of the water resource present in the aquifer (Pérez, 2021).

This research seeks to carry out a hydrological modeling through a precipitation-runoff model, to obtain the water balance of the aquifers and evaluate the resource of the area; in addition to generating the recharge series of the study area and through hydrological modeling, to be able to simulate the information that does not exist in the Cotija aquifer. To achieve this, it will be necessary to carry out the characterization of the aquifer, meeting all the physical conditions to which it is subject, such as; relief, geology, extractions, etc.

Keywords: Hydrological modeling, Témez Model, Zamora and Cotija Aquifers, Characterization, Evalhid, Modflow.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	10
2.	JUSTIFICACIÓN.....	12
3.	HIPÓTESIS	13
4.	OBJETIVOS	13
5.	MARCO TEÓRICO	14
5.1.	ANTECEDENTES	14
5.2.	MODELOS HIDROLÓGICOS	16
5.3.	HIDROLOGÍA	17
5.4.	CICLO HIDROLÓGICO	18
5.4.1.	PRECIPITACIÓN	19
5.4.2.	ESCURRIMIENTO.....	19
5.4.3.	EVAPOTRANSPIRACIÓN	20
5.4.4.	INFILTRACIÓN	21
5.5.	AGUA SUBTERRÁNEA.....	21
5.6.	ACUÍFEROS.....	21
5.6.1.	CARACTERIZACIÓN DE ACUÍFEROS	22
5.7.	SITUACIÓN ADMINISTRATIVA DE LOS ACUÍFEROS EN ESTUDIO	22
5.7.1.	ZAMORA	22
5.7.2.	COTIJA.....	23
6.	METODOLOGÍA.....	24
6.1.	MATERIALES	24
6.2.	BASES DE DATOS.....	24
6.2.1.	INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA (NEGI)	24
6.2.2.	CLIMATE COMPUTING PROJECT (CLICOM).....	25
6.2.3.	BANCO NACIONAL DE DATOS DE AGUAS SUPERFICIALES (BANDAS).....	25
6.2.4.	REGISTRO PÚBLICO DE DERECHOS DE AGUA (REPDA)	25
6.3.	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	26
6.4.	GESTIÓN DE DATOS	26
6.4.1.	POLÍGONOS DE THIESSEN.....	26
6.4.2.	PRUEBAS EN LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....	27
6.4.3.	PRUEBA DE SECUENCIAS.....	28
6.4.4.	PRUEBA DE HELMERT	29
6.4.5.	LÍMITES DE ANDERSON.....	29

6.5.	ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES	31
6.6.	CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN	32
6.6.1.	MÉTODO DE THORTHWAITE.....	32
6.7.	MODELACIÓN SUPERFICIAL	34
6.7.1.	MODELO DE TÉMEZ.....	34
6.7.2.	MÓDULO EVALHID.....	36
6.7.3.	CALIBRACIÓN DEL MODELO SUPERFICIAL	38
6.8.	DISCRETIZACIÓN DEL ACUÍFERO.....	41
6.9.	OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN PARA MODFLOW	43
6.9.1.	TIPOS DE CELDAS	45
7.	RESULTADOS.....	46
7.1.	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	46
7.2.	RECOPIACIÓN DE DATOS.....	54
7.2.1.	ESTACIONES METEREOLÓGICAS	54
7.2.2.	ESTACIONES HIDROMÉTRICAS.....	58
7.3.	MODELACIÓN SUPERFICIAL	60
7.3.1.	CALIBRACIÓN DE LAS SUBCUENCAS	61
7.3.2.	CALIBRACIÓN CUENCA 8.....	62
7.3.3.	CALIBRACIÓN CUENCA 5.....	66
7.3.4.	SIMILITUD HIDROLÓGICA “CUENCA COTIJA”	71
7.4.	CARACTERIZACIÓN CON MODFLOW	77
7.4.1.	MANANTIALES	77
7.4.2.	POZOS DE EXTRACCIÓN	78
7.4.3.	NIVELES PIEZOMÉTRICOS	79
7.4.4.	MAPA NIVEL ESTÁTICO	80
7.5.	MODELO EN MODFLOW.....	81
8.	CONCLUSIONES	84
9.	REFERENCIAS	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo Hidrológico.	19
Figura 2. Diagrama de pruebas de consistencia.....	27
Figura 3. Diagrama aceptación de mes.	28
Figura 4. Representación del ciclo hidrológico del modelo Témex. Fuente. (Arquiola, 2017)	35
Figura 5. Esquema de flujos y almacenamiento del modelo témex. Fuente (Arquiola, 2017)	36
Figura 6. Estructura del programa Evalhid. Fuente (Arquiola, 2017).....	37
Figura 7. Discretización del acuífero. Fuente: (Chiang y Kinzelbach, 1998).....	42
Figura 8. Tipos de celdas para modflow. Fuente: (W.Harbaugh, 2005).....	45
Figura 10. Ubicación de los acuíferos Zamora y Cotija.....	46
Figura 11. Regiones hidrológicas de los acuíferos en estudio.....	47
Figura 12. Municipios comprendidos dentro de la zona de estudio.	48
Figura 13. Elevaciones dentro de los acuíferos estudiados.	49
Figura 14. Sistema de corrientes de la zona de estudio.....	50
Figura 15. Uso de suelo en la zona de estudio.....	51
Figura 16. Tipo de suelo en los acuíferos estudiados.....	52
Figura 17. Geología presente en los acuíferos estudiados.....	53
Figura 18. Tipos de clima dentro de la zona de estudio.....	54
Figura 19. Estaciones Meteorológicas iniciales para la zona de estudio.....	55
Figura 20. Estaciones meteorológicas principales en la zona de estudio.	56
Figura 21. Correlograma de estación 11142 mostrando la independencia temporal de acuerdo a los límites de Anderson.....	57
Figura 22. Polígonos de Thiessen en la zona de estudio.	58
Figura 23. Estaciones hidrométricas cerca de la zona de estudio.....	59
Figura 24. Estaciones hidrométricas para la calibración del modelo.	60
Figura 25. Cuencas de calibración y sus puntos de salida.....	61
Figura 26. División de microcuencas en la cuenca 8.....	62
Figura 27. Red hidrográfica y estaciones meteorológicas de la cuenca 8.....	63
Figura 28. Estaciones ficticias para la cuenca 8.....	64
Figura 30. Ecurrimientos mensuales resultantes (hm^3) de la cuenca 8.....	65
Figura 31. Ecurrimientos anuales resultantes (hm^3) de la cuenca 8.....	65
Figura 32. Ecurrimientos de año medio resultantes (hm^3) de la cuenca 8.....	66
Figura 33. División de microcuencas en la cuenca 5.....	67
Figura 34. Red hidrográfica y estaciones meteorológicas de la cuenca 5.....	68
Figura 35. Estaciones ficticias de la cuenca 5.....	69
Figura 37. Ecurrimientos mensuales resultantes (hm^3) de la cuenca 5.....	70
Figura 38. Ecurrimientos anuales resultantes (hm^3) de la cuenca 5.....	70
Figura 39. Ecurrimientos de año medio resultantes (hm^3) de la cuenca 5.....	71

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

Figura 40. Microcuencas de la cuenca Cotija.....	72
Figura 41. Uso de suelo en cuencas de comparación.	73
Figura 42. Tipo de suelo en cuencas de comparación.	74
Figura 43. Ventana de Evalhid con el resumen de parámetros.	75
Figura 44. Ventana de Evalhid con las microcuencas y el punto de desagüe de la cuenca Cotija.	75
Figura 45. Balance hídrico acuífero 1622 - Cotija	76
Figura 46. Balance hídrico del acuífero 1608 – Zamora.....	77
Figura 47. Manantiales dentro de los acuíferos estudiados.	78
Figura 48. Pozos de extracción en los acuíferos de Zamora y Cotija.....	79
Figura 49. Pozos con registro de nivel Piezométrico en los acuíferos.....	80
Figura 50. Comportamiento de nivel estático, según datos de CONAGUA.....	81
Figura 51. Mallado en los acuíferos de Zamora y Cotija con 2km x 2 km.	82
Figura 52. Matriz de condiciones de entorno en Excel.	83
Figura 53. Resultados de niveles simulados en Modflow.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cambios permitidos para la prueba de secuencias	29
Tabla 2. Valores de Ka	33
Tabla 3. Rangos de ajustes	40
Tabla 4. Valores estimados de la conductividad hidráulica (metros/día)	43
Tabla 5. Valores estimados de la porosidad (%).....	44
Tabla 6. Municipios correspondientes a cada acuífero.....	48
Tabla 7. Resultados de las pruebas de Homogeneidad y límites de Anderson.	56
Tabla 8. Información de estaciones principales	57
Tabla 9. Límites de Anderson y coeficiente de auto correlación para la estación meteorológica con clave 11142.	57
Tabla 10. Estaciones meteorológicas necesarias para calibrar la cuenca 8.	63
Tabla 11. Estación hidrométrica necesaria para calibrar la cuenca 8.	63
Tabla 12. Valores de las funciones objetivo del algoritmo calibrador SCE-UA para la cuenca 8.	64
Tabla 13. Estaciones meteorológicas para calibrar la cuenca 5.	68
Tabla 14. Estación hidrométrica necesaria para calibrar la cuenca 5.	68
Tabla 15. Valores de las funciones objetivo del algoritmo auto calibrador SCE-UA para la cuenca 5.....	69
Tabla 16. Parámetros de calibración del modelo hidrológico.	76

1. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos más importantes para el desarrollo integral y digno de los individuos, es un recurso natural esencial para la vida, ya que posee propiedades únicas, es el líquido vital necesario para todos los seres vivos, y sin dudar, el agua es el elemento indispensable en la Tierra. El ser humano necesita agua para satisfacer sus necesidades básicas y secundarias, tales como ganadería y agricultura, transformación de energía, y de las más importantes el consumo, es por esto que resalta su importancia.

A pesar de que el agua es un recurso abundante en nuestro planeta, solo el 2.5% es agua dulce, de este porcentaje, cerca del 80% de agua no está disponible para consumo humano debido a que se encuentra en forma de glaciares, nieve o hielo; además, la calidad del agua se ve afectada mayormente por actividades de origen antrópico. Recordemos que el agua es un recurso renovable pero finito, es decir que el uso excesivo del agua y su distribución irregular hace que el agua se convierta en un recurso escaso en muchas regiones. Si continua el uso desmedido y descuidado del agua, se podrían presentar graves problemas que podrían provocar que este recurso cada vez sea más caro y difícil de conseguir. El agua es vida y deberíamos tomar más conciencia sobre el uso que hacemos de ella y cómo la repartimos (Cirelli, 2012).

Desafortunadamente en nuestra sociedad no existe el conocimiento ni la conciencia sobre las consecuencias de la sobreexplotación, deterioro y desperdicio de los recursos hídricos en el mundo.

De acuerdo con el Instituto de Recursos Mundiales, en la última actualización del Acta de Estrés Hídrico en 2019, México se encuentra en el lugar 24 de 164 a nivel internacional de los países que enfrentan un estrés hídrico extremadamente alto, porque consume alrededor del 80% de las reservas de agua, y a nivel Latinoamérica ocupa la segunda posición después de Chile.

En la actualidad el 47% de la población en México no tienen acceso al agua potable, debido a que no se cuenta con la capacidad suficiente para abastecer el servicio. Adicionalmente se presenta un conocimiento deficiente en cuanto a los sistemas acuíferos y el comportamiento del agua subterránea en ellos, al igual que una mala calidad y cantidad de información del recurso superficial, mismo que tiene influencia directa con el agua subterránea. Es necesario conocer cómo se genera y comporta el agua subterránea en los acuíferos ya que es la reserva más importante de agua dulce en el Planeta. Actualmente, debido a las demandas excesivas de la población, estos sistemas de agua subterránea se están sobreexplotando en su totalidad (Gálvez, 2011).

Por toda la problemática que existe actualmente con el líquido vital, el agua, se han buscado distintas formas de gestionar el recurso hídrico, y se seguirán haciendo por lo importante que es para el ser vivo. La problemática actual en torno al agua que se vive a nivel mundial,

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

demanda la búsqueda de metodologías que permitan gestionar el recurso hídrico. Lamentablemente, México carece de información necesaria para hacer los estudios hidrológicos superficiales y subterráneos, y a pesar de la poca información existente, en nuestro país se siguen realizando los balances hídricos en la mayoría de los acuíferos.

El agua subterránea es un recurso natural muy valioso, no solo en México, sino en todo el mundo. Debido a su importancia en el requerimiento social, económico y ambiental, las aguas subterráneas tienen una alta demanda de agua para abastecimiento público y para el desarrollo de sus actividades económicas.

En México están definidos 653 acuíferos y el 38.7% del agua utilizada en el país proviene de estas fuentes, de estos, 115 se encuentran actualmente en estado de sobreexplotación (17.6%), ya que de ellos se extrae un volumen mayor al 10% de su volumen de recarga (Pérez, 2021).

La lluvia como única fuente de alimentación de los procesos hidrológicos en una cuenca hidrológica es sin duda, uno de los componentes más importantes dentro de la ecuación de balance. En este aspecto, los países con un régimen de lluvia netamente estacionario o con amplias zonas desérticas, son propensos a presentar largos períodos de escasez o de exceso (Mijares J. A., 2006).

2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad estamos viviendo una grave problemática por malas gestiones de recurso hídrico, se tiene deficiente conocimiento acerca de los recursos hídricos, y más aún en los sistemas subterráneos. (Hernández, 2022)

Los acuíferos pertenecientes a la zona de estudio, como la mayoría de acuíferos en México, no cuentan con un buen contenido de información, debido a que no cuentan con los suficientes estudios previos dentro de la zona, así como tampoco existe conocimiento sobre el comportamiento de sistemas subterráneos. Así que es muy importante y necesario conocer cómo se genera y se comporta el agua tanto superficial como subterránea, principalmente porque el agua es un recurso vital para el ser vivo, y los acuíferos son la reserva más importante de agua dulce ya que son la única fuente permanente pero también, un recurso no renovable, por lo cual se debe de saber controlar para no agotar esta fuente de aprovechamiento sobreexplotándolo. Actualmente, debido a la demanda de la población se están explotando la mayoría de estos sistemas de aguas subterráneas, sobre todo sustentan el riego agrícola, ya que el mayor porcentaje de agua subterránea es suministrado por el riego. Por ende, se debería de tener un buen control sobre este recurso vital.

La necesidad de realizar este proyecto es por la falta de estudios tanto hidrológicos como subterráneos en la zona, sobre todo el acuífero que no cuenta con información es el de Cotija, aun así, el acuífero de Zamora, cuenta con escasa información y es necesario conocer la situación actual de toda la zona de estudio, y conocer su disponibilidad hídrica para una correcta gestión.

Es importante que México logre realizar una correcta gestión del recurso nacional, ya que la agricultura y ganadería demandan el 76% de cada litro de agua que el país produce. Por lo que es necesario revisar la demanda dentro del país y hacer una supervisión de todos los grandes usuarios del agua, como lo son también las industrias, es injusto que en distintas zonas del país se tengan pozos clandestinos porque existe una problemática de apropiación particular de agua y no exista recurso suficiente para las comunidades rurales.

3. HIPÓTESIS

La evaluación de los recursos hídricos en los acuíferos de Zamora y Cotija, permitirá conocer la disponibilidad de los recursos hídricos superficiales por medio de la calibración del modelo superficial y las aportaciones al acuífero, y posteriormente determinar las zonas potenciales de recarga al acuífero.

4. OBJETIVOS

GENERALES:

Determinar la disponibilidad de los recursos hídricos superficiales y las aportaciones a los acuíferos de Zamora y Cotija, implementando un modelo hidrológico del tipo precipitación-escurrimiento para determinar las infiltraciones y los escurrimientos; y posteriormente identificar las zonas potenciales de recarga al acuífero.

ESPECÍFICOS:

- Recopilar la información para el reconocimiento de la zona de estudio y gestión de datos.
- Realizar la modelación superficial de la cuenca que tiene relación con los acuíferos Zamora y Cotija implementando el modelo de Témez.
- Obtener los volúmenes de recarga de los acuíferos Zamora y Cotija.
- Determinar las zonas potenciales de recarga y descarga para ambos acuíferos.
- Caracterizar los acuíferos en estudio implementando el software processing Modflow for Windows (PMWiN).

5. MARCO TEÓRICO

5.1. ANTECEDENTES

La evaluación de los caudales de entrada en un sistema de recursos hídricos es fundamental para el adecuado análisis de su gestión. Estos caudales se pueden obtener a partir de modelos de balance hidrológico.

La construcción de un modelo hidrológico o subterráneo requiere de manera general información de precipitación, temperatura, e información muy específica como, información geográfica, fisiográfica e hidrométrica la cual es muy importante. En México, la disponibilidad de información oficial confiable y suficiente es un completo reto, debido a que no se encuentran con facilidad registros constantes y actualizados, por lo que no es una información de calidad.

La modelación matemática es la representación simplificada de un sistema o proceso real, pudiéndose llegar a expresar como algo cuantitativo. Un modelo matemático es entonces una abstracción que representa los procesos como ecuaciones, las propiedades físicas como constantes o coeficientes en las ecuaciones y las medidas o potenciales de estado del sistema como variables (Ihobe, 2006).

La implementación de diferentes modelos matemáticos se ha realizado de diferentes formas, en algunos casos se utilizan con el fin de evaluar el comportamiento hidrológico, como es el caso de este estudio, el comportamiento hidrológico se refiere ya sea agua superficial o subterránea, para lograr obtener información no disponible en la zona de estudio.

En un trabajo propuesto por Salla (2014) realizó un estudio donde aplicó la herramienta Evalhid para calibrar los parámetros y simular los caudales del río Aranguari, hace mención de que los modelos hidrológicos conceptuales más utilizados se pueden encontrar en publicaciones clásicas, tales como: Témez (Témez, 1977), HBV(Bergström, 1995), SCS (Cronshey et al., 1986), Sacramento (Burnash et al., 1973), SWM (Stanford Watershed Model - Linsley y Crawford 1966), HEC-HMS (Feldman, 2000), IPH II (Tucci et al., 1981), Topmodel (Beven, 1997), SWMM - Modelo de gestión de aguas pluviales (Huber et al., 1975), entre otros (Salla, 2014).

Adicionalmente Salla (2014) también establece que el modelo de Témez (Témez,1977) es un modelo de cuatro parámetros, con una larga historia de aplicación en Europa y América Latina, para la evaluación de los recursos hídricos (Pizarro et al., 2005; Murillo; Navarro, 2011; Baeza, 2011; Giménez, 2012; García et al., 2012; Maidment; Tarboton, 2013). Todo el proceso se rige por el principio de continuidad y balance de masas a escala mensual, con aplicación limitada a cuencas hidrográficas que presentan cierta homogeneidad climática y geológica (Salla, 2014).

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

La planificación y gestión de los recursos hídricos depende de una evaluación eficiente de los caudales superficiales y subterráneos, aunque en ocasiones la calidad de la información no sea la mejor, incluyendo la confiabilidad en la predicción de caudales. Para esto, las operaciones continuas en estaciones de monitoreo son fundamentales y complementarias.

En el año 2019 se realizó un trabajo por Amorim en la UFU (Universidad Federal de Uberlândia) que tuvo como objetivo realizar un estudio de gestión del agua a través de la plataforma AQUATOOL basado en el modelo EVALHID para modelar la recarga de agua subterránea en la cuenca del río Uberabinha durante un período de evaluación de 10 años. En relación a los resultados obtenidos se pudo percibir que la infiltración y/o recarga de agua está directamente influenciada por los valores de precipitación, evapotranspiración y escorrentía superficial (Jesús, 2019).

Granda (2019) publicó un artículo en la revista de ingeniería agrícola el cual llevó por nombre “Evaluación de los recursos hídricos en la cuenca San Diego ante escenarios de cambio climático” en donde usó modelo hidrológico de Témez, y fue calibrado a partir de la información histórica de los caudales medios mensuales en el río San Diego y combinados con modelos de cambio climático y escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, permitió evaluar la disponibilidad de agua en la cuenca San Diego, ubicada en la provincia de Pinar del Río, región occidental de Cuba, y sus resultados muestran que en el periodo de validación, el modelo hidrológico de Témez con los parámetros calibrados permite simular el 80% de los procesos hidrológicos reales que ocurren en el río San Diego (Granda, 2019).

En 2016 se desarrolló un estudio para el congreso latinoamericano de hidráulica que llevo por nombre “Comparativa de la norma oficial mexicana NOM-011-CONAGUA-2015 con el modelo Témez” cuyo objetivo fue realizar una comparación de la disponibilidad hídrica superficial (escurrimiento) obtenida con la metodología establecida por la NOM-011 y la obtenida por un modelo distinto de lluvia-escurrimiento. Para poder hacer la comparación fueron necesarios los datos de estaciones hidrométricas, y se estudió la parte alta de la subcuenca del río Angulo que se encuentra ubicado en la porción nororiental de Michoacán. En el estudio se concluyó que el modelo Témez presentó los valores más cercanos a los aforados por la estación hidrométrica (García-Romero et. al, 2016).

La estimación de los caudales, por lo regular no son medidos, por lo que carecen de registros históricos. Es por esta razón que los modelos hidrológicos pueden permitir realizar estimaciones de los caudales. La problemática es que algunas de las cuencas no cuentan con el instrumento de medición de caudales, o con información necesaria para realizar un modelado hidrológico apropiadas para algún sitio. Por lo tanto, existe métodos como el modelo racional modificado de Témez, por lo que se presenta una investigación en 2021 por Cely-Calixto, Carillo-Soto y Becerra-Moreno en la cual este modelo mencionado fue aplicado y validado en cuencas hidrográficas del norte de Santander para poder estimar los valores de caudales extremos con un periodo de retorno de 100 años, se dieron a la tarea de seleccionar 11 cuencas que contenían datos históricos de precipitaciones superiores a 20

años y un drenaje de red de menos de 1000 km², y encontraron que el modelo de Teméz sobreestima los flujos reales de esas 11 cuencas previamente seleccionadas. El estudio llevó por nombre “Validation of the modified Teméz rational model in the watersheds of Norte de Santander, Colombia” (Cely-Calixto et. al, 2021).

La incorporación de la dinámica nival a los modelos hidrológicos también es de suma importancia, para los sitios donde se requieran, las altas montañas constituyen una fuente valiosa de los recursos hídricos para distintos usos, ya que en estas cuencas las aportaciones pueden ser reguladas de forma natural o también por la dinámica nival (nieve). Arrabal (2015) hizo un estudio donde incorporó la dinámica nival al código de precipitación-aportación de Témez para tener en cuenta la acumulación y fusión de la nieve y los resultados los comparo con HBV, ya que este segundo está muy contrastado en modelos donde se involucre la nieve porque en su formulación esta incorporado el efecto del deshielo. Pese a la falta de información disponible Cabrera Arrabal obtuvo resultados satisfactorios (Arrabal, 2015).

En los acuíferos correspondientes a este trabajo, se han hecho algunos estudios como el realizado en el acuífero de Zamora en 1977, donde se hizo un censo hidráulico y se contabilizó un total de 250 captaciones agua subterránea, de las cuales 147 son pozos, 32 norias y 71 manantiales. El volumen extraído por pozos anualmente es de aproximadamente 26hm³ y son destinados en su totalidad a usos domésticos, potables e industriales. El descargado por manantiales anualmente es de unos 275 hm³ y destinados en su totalidad al uso agrícola. El estudio llevó por nombre “Estudio Geohidrológico de evaluación y censo del estado de Michoacán”. Se realizó en diciembre de 1977 (CONAGUA, 2021).

Ferreira (2001) se basó en un modelo hidrológico, en el que se inició utilizando tres conjuntos de datos climatológicos diferentes, y se compararon con el resultado del modelo hidrológico, el objetivo principal del estudio era verificar la sensibilidad del modelo a los conjuntos de datos de entrada y descubrir cual era el conjunto de datos que mejor representa a la climatología de la cuenca, los resultados del modelo hidrológico los comparó con el conjunto de datos que fueron considerados como referencia y concluyeron que los datos que se obtuvieron a la salida del modelo (descarga del río) Estuvieron con mejor calidad que los resultados obtenidos con el conjunto de datos (Ferreira, 2001).

5.2. MODELOS HIDROLÓGICOS

Existen muchos tipos de modelos hidrológicos, que se pueden realizar de una manera, empírica, conceptual o teórica, de forma agregada, distribuida o casi distribuida, dependiendo del objetivo de estudio, la experiencia del modelador, así como las características de fisiográficas de la cuenca, datos de entrada y salida disponibles (Correa, 2015). El objetivo de un sistema hidrológico es el estudio de cómo opera un sistema y poder

predecir su salida o respuesta. Por su parte, un modelo hidrológico es una aproximación de la simulación del ciclo hidrológico y todas las variables que intervienen en este.

Los modelos hidrológicos toman como unidad fundamental a la cuenca hidrológica. La generación del escurrimiento, básicamente se encuentra relacionado con la precipitación, temperatura y características del suelo, para generar la escorrentía superficial, se hace mediante los modelos que realizan un balance de las variables antes mencionadas (precipitación, temperatura y características del suelo) así es posible obtener la infiltración que se recargan a los acuíferos. Por otro lado, los modelos hidrológicos subterráneos consideran como unidad fundamental la hidrogeología del acuífero; la recarga de los acuíferos, se encuentra relacionada con el movimiento del agua a través de las formaciones geológicas, destacando parámetros como: la conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento para reproducir el movimiento del agua subterránea. Incorporando entradas y salidas al modelo es posible determinar el estado del acuífero, llegando a conocer zonas de abatimiento del nivel piezométrico y zonas potenciales de recarga, lo anterior para implementar medidas del uso adecuado del sistema subterráneo (Urbina, 2018).

5.3. HIDROLOGÍA

La hidrología es la base de esta investigación y se entiende que la es una ciencia que estudia las aguas del planeta, los océanos, la atmósfera y la superficie terrestre. Pero Según Chow (1964):

“Hidrología es la ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas, y su relación con el medio ambiente, incluyendo los seres vivos.”

La hidrología entonces estudia el agua, su ocurrencia, su distribución en la superficie terrestre, sus propiedades físicas y químicas y su relación con el ambiente, la hidrología surgió con las primeras obras de ingeniería para poder establecer las primeras ciudades y poder tener agua. En la hidrología cada caso nuevo es un problema de investigación y esta se apoya de distintas ciencias ya que la circulación del agua es por diferentes medios, las principales son geografía, meteorología, geología, hidráulica, matemáticas, estadística, física, química, biología. Un análisis hidrológico involucra un conjunto de datos bastante extenso que requiere de su compilación y análisis para observar si estos datos de precipitación, temperatura y escurrimientos, conforman, o, son relevantes y representativos en la zona de estudio. En ocasiones existe la problemática de no existir la cantidad de datos históricos suficientes, dado que la precisión de las soluciones hidrológicas nace a partir de cálculos de ingeniería y para eso se requiere un factor de seguridad (el factor de seguridad son los datos) esta es la principal razón de que es importante que los datos sean lo más preciso posible.

Los encargados del diseño y operación de proyectos de ingeniería para el control y aprovechamiento de agua son los hidrólogos. Su objetivo es determinar los eventos extremos para planear su diseño estructural, esto depende de volúmenes y gastos almacenados, así como la disponibilidad de fuentes naturales.

5.4. CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico es el proceso desde el cual se inicia el estudio de la hidrología, y gracias a él se da la circulación general de agua en la Tierra, según Aranda (1983) lo define como:

“Sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y volver a la atmósfera” (Aranda, 1983).

Entonces, el agua en la naturaleza no permanece estática, al movimiento masivo del agua, esencialmente causado por la energía del sol se conoce como ciclo hidrológico ya mencionado anteriormente como la sucesión de etapas del agua. Conocer este ciclo es muy importante y es el proceso de circulación del agua entre los distintos compartimentos de la hidrosfera, y atraviesa los tres estados de la materia, sólido, líquido y gaseoso. De forma muy sencilla explicamos que de forma natural el agua en la superficie terrestre y en los cuerpos de agua se evapora esto sucede por la radiación del sol y el viento. El vapor se condensa y se transporta a través de las nubes hasta que se precipita en forma de lluvia, esta a su vez se evapotranspira, fluye o se infiltra. Una parte la absorben las plantas y la evapotranspiran, otra parte fluye hasta llegar a los cuerpos de agua y otra se infiltra de forma superficial o subterránea. Estas diferentes etapas generan un verdadero ciclo, ya que su inicio ocurre donde posteriormente concluye.

La evaporación es el proceso por el cual el agua pasa del estado líquido en que se encuentra en los almacenamientos, conducciones y en el suelo, en las capas cercanas a su superficie, al estado gaseoso y se transfiere a la atmósfera (Aparicio, 1989).

Transpiración es el agua que se despiden en forma de vapor de las hojas de las plantas. Esta agua es tomada por las plantas, naturalmente, del suelo (Aparicio, 1989).

Evapotranspiración es la combinación de evaporación y transpiración (Mijares F. J., 1989).

Uso consuntivo es la combinación de evapotranspiración y el agua que las plantas retienen para su nutrición. Esta última cantidad es pequeña en comparación con la evapotranspiración (aproximadamente representa sólo el 1%), por lo que los términos evapotranspiración y uso consuntivo se usan como sinónimos (Aparicio, 1989).

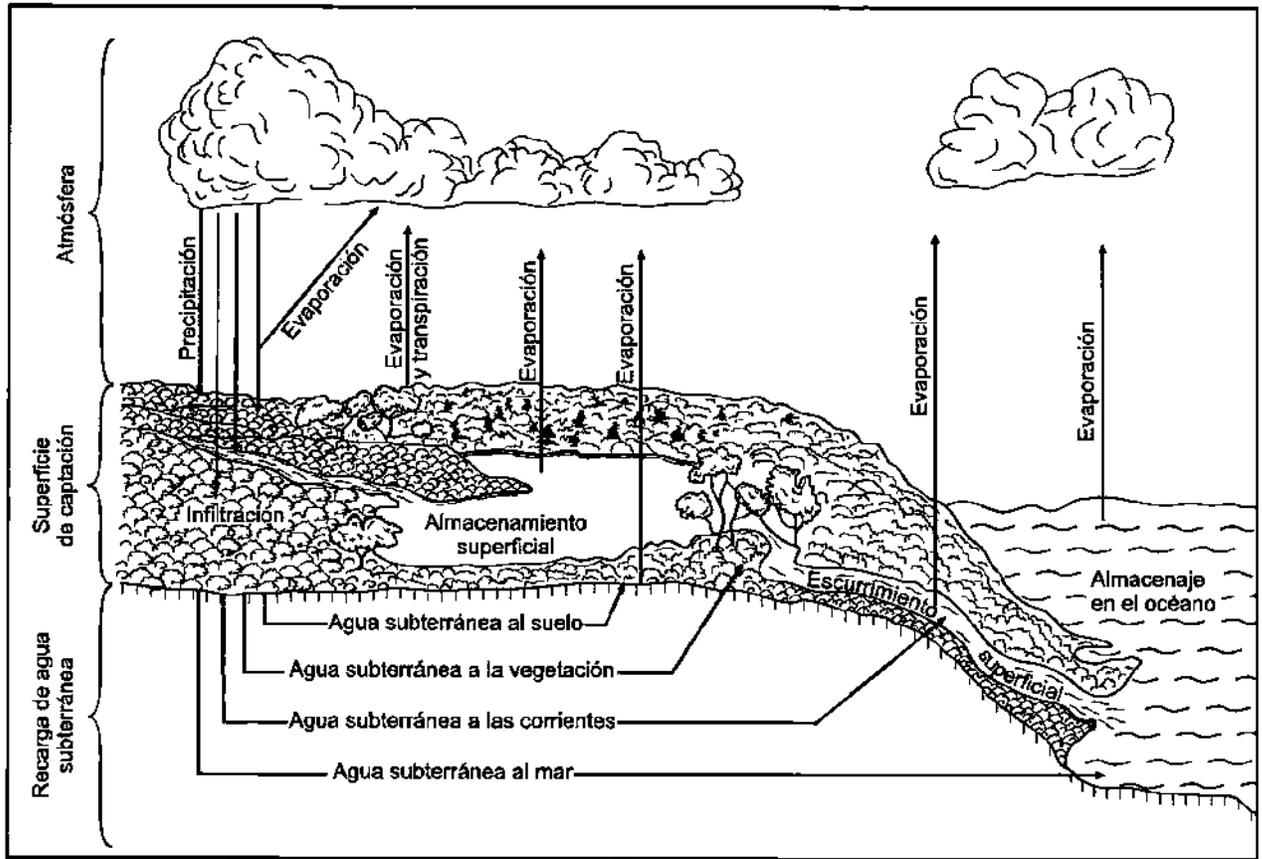


Figura 1. Ciclo Hidrológico.

5.4.1. PRECIPITACIÓN

Es el fenómeno físico que consiste en la transferencia de volúmenes de agua entre la atmósfera y la superficie terrestre, simplemente la caída de partículas de agua líquidas o sólidas a la superficie terrestre. La precipitación es una fase importante del ciclo hidrológico, ya que da origen a las corrientes superficiales y subterráneas por eso en cualquier estudio hidrológico la precipitación es lo primero a analizar una vez que se tenga la zona de estudio.

La información de la precipitación en México se obtiene a por medio de una red meteorológica, basada en pluviómetros y pluviógrafos.

5.4.2. ESCURRIMIENTO

Se puede definir como la parte de la precipitación que aparece en las corrientes (por los cauces, ríos o por el subsuelo) y que regresa al mar o a los cuerpos de agua interiores. El escurrimiento se puede dividir en:

- Escurrimiento superficial o escorrentía: Es la parte del agua que escurre por el suelo y después por los cauces de los ríos.

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

- Ecurrimiento subsuperficial: Parte del agua que se desliza a través de los horizontes superiores del suelo hacia las corrientes.
- Ecurrimiento subterráneo: Es aquel que, debido a una profunda infiltración en el suelo, se lleva a cabo en los mantos subterráneos y posteriormente, descarga a las corrientes fluviales.

En México la medición del escurrimiento superficial es mediante las estaciones hidrométricas, las cuales están colocadas en sitios para medir el gasto que está transitando por las corrientes. Se deben colocar en un lugar que sea de fácil acceso en cualquier tiempo y condición, sobre todo durante fuertes avenidas.

5.4.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN

Volumen de agua que desde el estado líquido o sólido pasan a la atmósfera o estado de vapor ya sea por evapotranspiración directa o transpiración de las plantas. Se expresa como “mm” por un determinado tiempo. La evapotranspiración es un parámetro difícil de determinar debido a que depende de factores ligados a la meteorología, la vegetación y el suelo, y todos estos parámetros quitan precisión ya que condicionan su capacidad de almacenamiento de agua. Evapotranspiración será entonces la pérdida combinada de agua en forma de vapor, que contiene la evaporada directamente del suelo y la transpirada por las plantas, a la atmósfera.

Además, en 1948 Thorthwaite describe lo que es evapotranspiración potencial y evapotranspiración real.

- Evapotranspiración potencial (ETP): Volumen de agua que pasa a la atmosfera en forma de vapor en el supuesto caso de que siempre hubiese la cantidad de agua disponible necesaria a tales efectos: Evapotranspiración + Transpiración, no depende por lo tanto del valor de la precipitación ni de la cantidad de agua contenida en el suelo a disposición de las plantas.
- Evapotranspiración real (ETR): Volumen de agua que pasa a la atmosfera en forma de vapor: Evaporación + Transpiración, en función del volumen de agua disponible.

Por definición se entiende entonces que:

$$ETP \geq ETR$$

Ya que ETR está condicionada por la cantidad de agua disponible en un momento determinado; ya sea la precipitación o la humedad en el suelo.

La evapotranspiración se calcula mediante:

- 1) Medios directos: Evapotranspirometros, Lisímetros.
- 2) Balances de agua en el suelo
- 3) Formulas empíricas: Thorthwaite, Turc, Penman, Blaney-Criddle.

5.4.4. INFILTRACIÓN

La infiltración es el movimiento de agua de la superficie hacia el interior del suelo, es un proceso de gran importancia, para un agricultor se puede ver como una ganancia, sin embargo, vista por un ingeniero como una pérdida. A nivel profesional, medir la infiltración resulta muy complicado ya que no hay instrumentos que puedan realizar una medición adecuada y directa, ya que el cambio de permeabilidad de los suelos varía de manera drástica.

De acuerdo con Rascon (2005), el proceso de infiltración se pueden distinguir 3 fases:

- 1) Intercambio: se presenta en la parte superior del suelo, donde el agua puede retornar a la atmósfera por medio de la evaporación debido al movimiento capilar o por medio de la transpiración de las plantas.
- 2) Transmisión: Ocurre cuando la acción de la gravedad supera a la capilaridad y obliga al agua a deslizarse verticalmente hasta encontrar una capa impermeable.
- 3) Circulación: Se presenta cuando el agua se acumula en el subsuelo debido a la presencia de una capa impermeable y empieza a circular por la acción de la gravedad, obedeciendo las leyes del escurrimiento subterráneo (Rascon, 2005).

5.5. AGUA SUBTERRÁNEA

Es el agua que se aloja y circula en el subsuelo, conformando los acuíferos recibe el nombre de agua subterránea. La fuente de aporte principal es el agua de lluvia, mediante el proceso de infiltración. Otras fuentes de alimentación localizada pueden ser los ríos, arroyos, lagos y lagunas. El agua subterránea se sitúa por debajo del nivel freático y está saturando completamente los poros y/o fisuras del terreno y fluye a la superficie de forma natural a través de vertientes o manantiales o cauces fluviales. El movimiento del agua en los acuíferos se presenta desde zonas de recarga a zonas de descarga, con velocidades que van desde metros por año a cientos de metros por día, con tiempos de residencia largos resultando grandes volúmenes de almacenamiento, aspectos característicos del agua subterránea (Caraballo, 2012).

5.6. ACUÍFEROS

México tiene definidos 653 acuíferos y el 38.7% del agua utilizada en el país proviene de estas fuentes.

El agua subterránea existe en los llamados “acuíferos”. que son formaciones geológicas hidráulicamente conectadas entre sí, por las que circula o se almacenan las aguas subterráneas, que luego pueden ser extraídas para su utilización. Estos depósitos o estanques naturales de agua ubicados debajo de la superficie terrestre pueden ocupar extensiones que van desde unos pocos kilómetros cuadrados hasta de muchos miles de

kilómetros cuadrados, donde el agua se encuentra en un movimiento lento y continuo. En los acuíferos el agua se renueva muy lentamente en comparación con la de los cuerpos de agua superficial, tales como ríos y lagos. El periodo necesario para renovar por completo un depósito es muy largo. Sin embargo, otros no son renovables porque están a gran profundidad y, si se explotan sin control, pueden agotarse definitivamente. El comportamiento de los acuíferos está principalmente gobernado por las características de la formación geológica que los delimita: la porosidad y la permeabilidad (IMTA, 2019).

En relación a las aguas subterráneas y para fines de administración, México tiene delimitados 653 acuíferos, de los cuales 195 (30%) están sin disponibilidad; es decir, que la totalidad del volumen disponible ya está concesionado o comprometido. Del total, 105 acuíferos (16%) se encuentran en condición de sobreexplotación, 32 (5%) con presencia de suelos salinos y agua salobre y 18 (3%) con intrusión marina (Farfán, 2019).

Las aguas subterráneas desempeñan un papel de fundamental importancia en el desarrollo económico de México, revelando en la dimensión del volumen que aporta para ser utilizado por los principales usuarios. El 38.7% del volumen total concesionado para uso consuntivo (agrícola, consumo público e industrial); es decir 32 906 millones de metros cúbicos por año al 2014, corresponden a aguas subterráneas (Farfán, 2019).

5.6.1. CARACTERIZACIÓN DE ACUÍFEROS

De acuerdo a las necesidades que se requieran existen diferentes tipos de caracterización de acuíferos entre los más comunes esta la hidrogeológica y la hidro-geoquímica. La primera como su nombre lo dice se enfocan en las condiciones geológicas así también como a las condiciones físicas a las que está sujeto el mismo acuífero para que pueda permitir así dar una respuesta al posible funcionamiento.

Los acuíferos consisten en un sistema rocoso de formación geológica, principalmente heterogénea, con espacios vacíos los cuales pueden ser poros, grietas y fracturas, llenos de agua. Lo que identifica a un acuífero de otro es que dentro de cada uno de ellos existe una continuidad física de agua en la zona de saturación por lo que se podría imaginar que una molécula de agua puede pasear libremente por esta unidad. Dos sistemas acuíferos son diferentes cuando esta partícula tiene que pasar por una zona seca si quiere llegar al otro sistema (Alvar González, 2017).

5.7. SITUACIÓN ADMINISTRATIVA DE LOS ACUÍFEROS EN ESTUDIO

5.7.1. ZAMORA

DECRETOS DE VEDA

Según información proporcionada por la Comisión Nacional del Agua, en 1987 se estableció una veda en todo el Estado de Michoacán, aunque se trata de una veda de control que no limita la construcción de nuevos aprovechamientos para todo uso. Hasta la fecha, no se ha

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

decretado ninguna zona de reserva de agua para un uso específico. Las diferentes vedas hasta ahora decretadas (CONAGUA, 2021), se enlistan a continuación:

- Salitre, 11 de febrero de 1956
- Bajo Balsas, 27 de junio de 1975
- Resto del estado, 20 de octubre de 1987

El volumen anual concesionado según los registros del balance hidráulico de este acuífero a diciembre de 1999 es de 107,144 hm³ siendo los principales usuarios para uso agrícola, los diversos productores del valle de Zamora. Dentro del uso público urbano los principales usuarios son los organismos operadores de los diversos municipios que forman parte del acuífero; dentro del uso industrial están principalmente las empacadoras de frutas; en el uso de servicios se encuentran como principales usuarios los hospitales del IMSS, diversas empacadoras y gasolineras (CONAGUA, 2021).

5.7.2. COTIJA

DECRETOS DE VEDA

Existen 6 decretos de veda en el Estado de Michoacán, el más reciente del 20 de octubre de 1987, en donde se estableció una veda en todo el estado por tiempo indefinido, para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en todos los municipios. Hasta la fecha no se ha decretado ninguna zona de reserva de agua para uso específico, en esta zona en particular se tienen la siguiente zona de veda (CONAGUA, 2021).

El volumen anual concesionado según los registros en el balance hidráulico de este acuífero al 31 de enero del 2000 es de 26.991 mm³, siendo los principales usuarios, los diferentes productores agrícolas de la región, destacando por el volumen de consumo el ejido Gildardo Magaña. Dentro del uso público urbano los principales usuarios son los Comités de agua potable de las diferentes comunidades y los Organismos Operadores de los municipios que conforman el acuífero (CONAGUA, 2021).

6. METODOLOGÍA

En este apartado se describe la metodología desarrollada durante esta tesis para la evaluación de los recursos hídricos disponibles para la zona de los acuíferos Zamora y Cotija, y además identificar las zonas potenciales de recarga.

La gestión de datos es una parte importante en el trabajo y para evitar errores dentro de la gestión, se requiere realizar pruebas de homogeneidad (como son Secuencias y Helmert), y comprobar su independencia (mediante los límites de Anderson).

Para modelar la aportación subterránea a la zona de estudio, se propone el uso de una herramienta de simulación Precipitación-escorrentía (el software Evalhid), el cual puede utilizar modelos hidrológicos como Témez, con el cual se calculó 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.

Una vez generado y calibrado el modelo superficial, y conocer la recarga con el mapa de movimiento de agua Figura 47 se dan a conocer dónde están las zonas de recarga del acuífero.

6.1. MATERIALES

Siendo la simulación hidrológica superficial y caracterización subterránea los puntos importantes de esta investigación, se describen a continuación los modelos y herramientas a implementar.

6.2. BASES DE DATOS

Una base de datos no es más que un almacenamiento de información recopilada que se encuentra de manera organizada. Por lo regular estas bases de datos se encuentran de manera electrónica.

Para esta investigación se requieren de algunos datos necesarios como es la información climatológica e hidrométrica, incluso la información geográfica, estos datos necesarios se encuentran en las respectivas plataformas de gobierno y son facilitados para toda la población.

6.2.1. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA (INEGI)

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 a conocer las características de nuestro país y ayudar a la toma de decisiones (Inegi, 2022).

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

Dentro de esta base de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) encontramos información de todo tipo, desde la tasa de población a nivel nacional, hasta actividades económicas de cada estado, municipio o localidad. También se encuentran los diferentes tipos de mapas como topografía, recursos naturales, relieve continental, etc.

Para esta investigación en particular se requiere la descarga de información vectorial y en formato ráster, tales como el modelo digital de elevación (MDE) este mapa se puede descargar con diferentes resoluciones, 1:1000000, 1:250000, 1:50000 y 1:20000, en esta investigación utilizamos la resolución 1:50000, es muy importante para la generación de las cuencas hidrográficas (Contreras, 2021).

6.2.2. CLIMATE COMPUTING PROJECT (CLICOM)

CLICOM es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, que significa CLimate COMputing project. Las observaciones son diarias del CLICOM representan los datos recopilados durante las últimas 24 horas, finalizando a las 08:00 AM. Cada una de las diferentes estaciones del país contiene diferentes periodos de información, pero se pueden encontrar datos de 1920 a 2012 (Cicese, 2022).

Esta base de datos permite realizar una elección preliminar de las estaciones meteorológicas a utilizar en el estudio, así también como descargar la información climática como precipitación y temperatura para manipular los datos y seleccionar las estaciones más favorables para el estudio en específico (Farfán, 2019).

6.2.3. BANCO NACIONAL DE DATOS DE AGUAS SUPERFICIALES (BANDAS)

El manejo digital de la información hidrométrica es de suma importancia para la gestión del recurso hídrico del país. Por ello, 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.

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 aproximadamente 180 presas. (Imta, 2011). En esta base de datos descargamos la información de estaciones hidrométricas, necesarias para generar las cuencas en la zona de estudio y poder realizar la modelación hidrológica.

6.2.4. REGISTRO PÚBLICO DE DERECHOS DE AGUA (REPDA)

“El Registro Público de Derechos de Agua, (REPDA) tiene como función esencial, la de inscripción de títulos con el fin de otorgar seguridad jurídica a los usuarios de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes; salvaguardando los derechos inscritos y

vigilando que toda persona tenga derecho a que se le muestren los asientos registrales y obtener constancia de los mismos”.

De dicha base de datos se descargan todos los títulos concesionados presentes en la zona de estudio, mismos que pertenecen a número de pozos de extracción, manantiales, norias, entre otros. Dichos registros de volumen concesionado se obtendrán en m³, así como el uso al que es destinado como agrícola, uso urbano, servicios, industrial, etc. (Pérez, 2021). Descargar esta información es necesaria para poder saber la cantidad de pozos de extracción que se encuentran dentro de la zona de estudio, para poder calcular el volumen de extracción proveniente de las aguas subterráneas.

6.3. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En esta etapa se delimita la zona de estudio utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG), y la información acerca de la zona de estudio será obtenida de las bases de datos mencionadas anteriormente obtendremos toda la información espacial de la zona como lo será la ubicación geográfica (macro y micro localización), cuáles son los municipios que se encuentran dentro de la zona y se abastecen de este recurso, tipo y uso de suelo, geología, hidrología, regiones hidrológicas, necesarias para las consideraciones que se deberán tomar en cuenta en el estudio.

6.4. GESTIÓN DE DATOS

Para la selección de estaciones tanto meteorológicas como hidrométricas, se obtienen las características espaciales como son longitud, latitud y elevación; años en estudio, en servicio y efectivos y, el porcentaje de datos vacíos que se presentan en la serie, el cual se recomienda que sea bajo para que el llenado de estaciones sea sencillo y no se altere la serie estudiada. (Farfán, 2019).

6.4.1. POLÍGONOS DE THIESSEN

Con los polígonos de Thiessen se puede ver la influencia que tienen las estaciones en la zona de estudio.

Se deberá tener una adecuada distribución de estaciones con la cuenca, ya que estas deben de cubrir la zona en su totalidad. Los polígonos de Thiessen deben de cubrir más del 90% de la zona de estudio, recordando que estos se generan con las estaciones meteorológicas.

Los polígonos de Thiessen se forman uniendo las estaciones y creando una línea perpendicular al centro recién generado; y al final deben de quedar interceptados por otras estaciones.

Los Polígonos de Thiessen no presentan mayores complicaciones en su aplicación. 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 intersecan entre sí. Con los límites del área en estudio y los que

definen las mediatrices se obtiene la superficie de influencia para cada estación (Pizarro, et al., 2003).

6.4.2. PRUEBAS EN LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Para realizar un estudio hidrológico se necesitan datos de entrada suficientemente buenos y confiables para que se pueda representar los fenómenos de precipitación-escorrentía de manera adecuada, estos datos son los datos de precipitación, información sacada de CLICOM, una base de datos ya descrita anteriormente.

Para demostrar que los datos meteorológicos son buenos y confiables, se deben aplicar un conjunto de pruebas de consistencia a las series de precipitación; estas pruebas estadísticas son necesarias para comprobar que las series de precipitación con las que vamos a trabajar cumplan con las siguientes condiciones: que sean homogéneas, independientes.

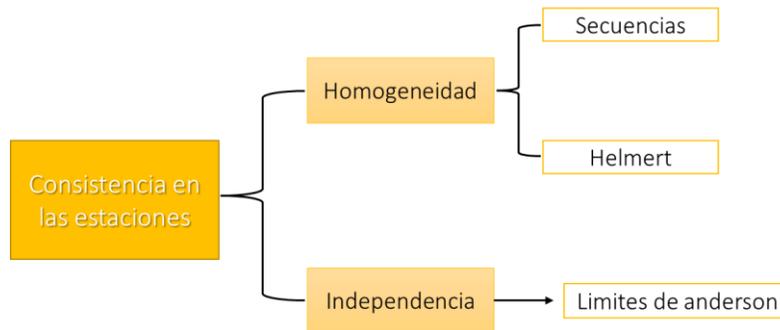


Figura 2. Diagrama de pruebas de consistencia

Para realizar las pruebas de consistencia, es necesario tratar los datos descargados ya que las pruebas se realizan con datos anuales, y no todos resultan válidos de acuerdo a los criterios que se establecerán a continuación.

Como primer punto los datos meteorológicos que se descargan tienen escala diaria, por lo que se deben sumar para generar series mensuales. Para que se pueda considerar el mes, se debe tener más de 21 días de datos, pueden ser consecutivos o no. Si se tienen menos de 21 días de datos se considera como mes nulo o sin datos, Figura 3:

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

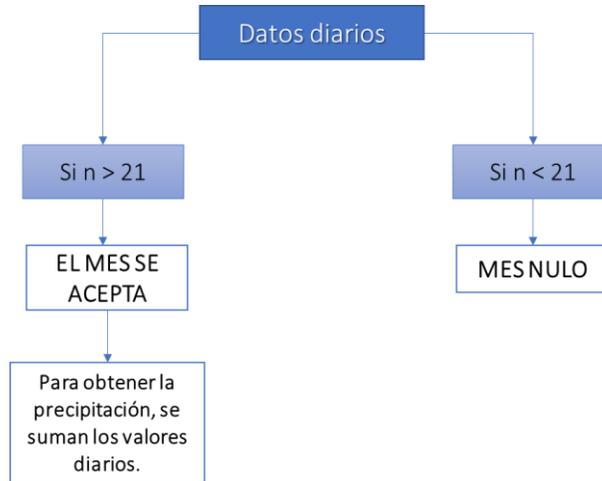


Figura 3. Diagrama aceptación de mes.

Las pruebas que aplicaron para evaluar la homogeneidad de las series son: el test de Secuencias, test de Helmert y Cramer, se puede decir que tienen como objetivo demostrar que los datos no cambian y que, por tanto, la información corresponde a una misma población.

En general, la no homogeneidad en los datos es inducida por las actividades humanas que alteran el régimen natural de la zona, por ejemplo, la deforestación, aperturas de nuevas zonas de cultivo, construcción de embalses, entre otros, así como por errores sistemáticos (Pérez, 2021).

La independencia hace referencia a que la ocurrencia de algún valor de precipitación no depende de algún otro valor de precipitación que le precedió en el pasado, por ejemplo, si un año antes llueve mucho, quiere decir que en el año que le precede lo hará de la misma manera (Arellano, 2021). Dentro de esta prueba de independencia se encuentran los Límites de Anderson.

La tendencia ocurre cuando ocurre algún salto o algún comportamiento ascendente o descendente dentro de la serie de precipitación. Esto se refiere a que la serie de precipitación años atrás tenga precipitaciones mayores y en algún año el valor de precipitación sea menor (o viceversa), esto da reflejo a que la serie de precipitación está siendo afectada por alguna razón, y puede ocurrir cuando la serie no es homogénea o es dependiente.

A continuación, se describe un fundamento teórico de las pruebas aplicadas.

6.4.3. PRUEBA DE SECUENCIAS

Esta es una prueba que 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) con base al tamaño de la muestra (n). Si el número de cambios está entre los valores establecidos en

la Tabla 1. Cambios permitidos para la prueba de secuencias, las series se consideran homogéneas.

Tabla 1. Cambios permitidos para la prueba de secuencias

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

6.4.4. PRUEBA DE HELMERT

Esta prueba es 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 aprobar que la serie es homogénea se aplica el siguiente criterio:

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

Donde:

n = número de datos.

6.4.5. LÍMITES DE ANDERSON

Los límites de Anderson son utilizados para hacer las pruebas de independencia, esto quiere decir que cada uno de los valores no depende de otro valor, son completamente ajenos entre sí.

Al utilizar los límites de Anderson, se considera un 95% del nivel de confianza, solo si menos del 10% de los valores de autocorrelación calculados supera los límites (superior e inferior) entonces se dice que la serie es independiente [4].

Formula de los limites superior e inferior:

$$r(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{n-k-1}}{n-k} \quad [4]$$

Para una serie independiente, la población del correlograma es igual a 0 para K diferente de 0.

$$K = \frac{n}{3} \quad [0]$$

Donde:

K= número de desfases

N=número de datos de precipitación anual

Para obtener el número de desfases se tendrá que dividir el número de datos de precipitación anual entre 3.

Para calcular el correlograma (ρ), se debe considerar que a partir de la serie original (X) se genera una serie modificada (Y) que depende del desfase (k) que se esté aplicando; de esta forma, para un mismo k, se tiene una serie X y una serie de Y (Farfán, 2019).

Entonces, según el número de desfases, será el número de valores que se tienen en el correlograma (ρ), representados en las Ecuaciones [1] y [3]; donde σ_x y σ_y son las desviaciones estándar de las series X y Y, respectivamente y n representa el número de datos de la serie (Farfán, 2019).

$$\rho = \beta \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad [1]$$

Donde:

ρ =correlograma

$\frac{\sigma_x}{\sigma_y}$ = desviación de x, y [2].

β = [3]

$$\sigma_{x,y} = \sqrt{\frac{\sum(X-\bar{X})^2}{n-1}} \quad [2]$$

Donde:

$\sigma_{x,y}$ =desviación de x, y.

X= serie de datos [X] que depende del desfase (k).

n= número de datos de precipitación anual.

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

Para la serie de X se tienen que ir eliminando datos del final de los datos de precipitación anual según el desfase en el que nos encontremos.

Para a serie de Y vamos eliminando valores del inicio de los datos de precipitación anual según el desfase en el que nos encontremos.

$$\beta = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} [3]$$

Para aplicar el valor de (β) se deberán conocer las sumatorias de las series (X) y (Y) de cada desfase las cuales ya se mencionaron anteriormente.

El valor (β) depende de un número de datos (n) y este número de datos va a estar cambiando de acuerdo al desfase (k).

6.5. ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES

Uno de los principales problemas que existen con las estaciones meteorológicas es la falta de información en suficiente cantidad y calidad, esto debido a los errores humanos que se tienen al realizar las mediciones día con día y es por eso que en repetidas ocasiones sus series presentan días, meses e incluso años vacíos.

Para esta investigación se debe de contar con una serie de precipitación completa. Y esto se consigue a través de los métodos de distribución espacial, lo que permite 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.

La buena medición y registro de datos es indispensable para poder llevar a cabo una buena modelación, pero por diversas situaciones existen periodos temporales en los cuales no se realizaron los cuales se traducen en incertidumbre, al adicionar datos a la serie que no reproducen el comportamiento original se agrega un porcentaje más de incertidumbre, siguiendo este sentido los métodos de llenado permiten completar los vacíos con datos estadísticamente consistentes, mas no reproducir los datos perdidos (Urbina, 2018).

Dado que las series requeridas como datos de entrada a los Modelos Precipitación – Escorrentía (MPE) son precipitación, temperatura y evapotranspiración, es necesario tener en cuenta el mismo periodo tiempo, que a su vez debe de coincidir con el periodo de la serie de datos de las estaciones hidrométricas (Farfán, 2019).

El método implementado en este trabajo para la estimación de datos faltantes en las series meteorológicas es el Inverso de la Distancia Euclidiana al Cuadrado (IDW). Este método se basa en la media ponderada que depende de la ubicación geográfica de las estaciones debido a la distancia euclidiana. Esta ponderación al tener un factor cuadrático recibe una influencia bastante fuerte del manto pluvial de las estaciones más cercanas, el valor que se encuentra de la precipitación depende de la correlación entre las estaciones de estudio y de la diferencia entre la precipitación media anual.

Recordando que la distancia euclidiana considera la diferencia entre longitud, latitud y elevación.

$$do1 = \sqrt{(x_o - x_i)^2 + (y_o - y_i)^2 + (z_o - z_i)^2}$$

Donde: do1= Distancia euclidiana y x_o, y_o, z_o = Coordenadas geográficas en UTM con un dato faltante o y un dato existente i.

La fórmula para obtener el valor faltante es:

$$P_x = \frac{p_1 \frac{1}{do^2}}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{doi^2}} + \frac{p_2 \frac{1}{do^2}}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{doi^2}} + \dots + \frac{p_m \frac{1}{do^2}}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{doi^2}}$$

Donde:

P_x= precipitación en el mes (x faltante)

P_m= precipitación media anual

Como se mencionó ya anteriormente, es el método que da mejores resultados y por ende es el método más utilizado.

6.6. CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

En México se usa fundamentalmente el método de Thorthwaite para el cálculo del uso consuntivo; el cual solo toma en cuenta la temperatura media mensual y arroja resultados estimativos que pueden usarse para estudios preliminares o de gran visión (APARICIO, 1992).

Para el presente estudio se utilizó el método de Thorntwaite porque es para estudios de gran visión y sería complicado obtener las evapotranspiraciones por el método de Blaney-Criddle ya que requiere además de la temperatura y horas de sol diarias, el tipo de cultivo, la duración de su ciclo vegetativo, la temporada de siembra y la zona, datos que son más complicados de capturar por la superficie que se está estudiando.

6.6.1. MÉTODO DE THORTHWAITE

Thorntwaite relacionó la temperatura media mensual, la evapotranspiración calculada para meses estándar de 30 días con 12 horas de luz para cuatro áreas diferentes de los Estados Unidos y expresó esa relación según la ecuación donde se ve que la evapotranspiración tiene una relación exponencial con la temperatura:

$$E_{tp} = cT^a$$

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

Donde:

ETp = evapotranspiración potencial mensual expresada en cm;

T = temperatura media mensual en °C; y,

a y c = coeficientes que varían según el lugar.

De este modo, como los coeficientes son hallados en función de observaciones en lugares depende de las características climáticas de los mismos. Con climas cálidos no darían valores correctos para Evapotranspiración en zonas de climas fríos y viceversa. Posteriormente Thorntwaite desarrolló una ecuación general:

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

Donde:

ETP= Evapotranspiración en el mes, en cm

T= temperatura media en el mes, en °C

a e I= constantes

Ka= constante que depende de la latitud y el mes del año en la Tabla 2:

Tabla 2. Valores de Ka

Latitud. grados.	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1-28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70

Las constantes I (índice de eficiencia de la temperatura) y a se calcula de la siguiente manera:

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

Donde:

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

J= Numero de mes

$$a = 675 \cdot 10^{-9} I^3 - 771 \cdot 10^{-7} I^2 + 179 \cdot 10^{-4} I + 0,492$$

6.7. MODELACIÓN SUPERFICIAL

El objetivo de esta modelación es poder realizar un balance hídrico y determinar los volúmenes de recarga directa que se generan de la precipitación hacia el acuífero.

6.7.1. MODELO DE TÉMEZ

Las ventajas que ofrece el modelo Témez ante zonas con cierta homogeneidad paramétrica es que, a pesar de ser un modelo de pocos parámetros, arroja resultados fiables.

Los 4 parámetros que controlan el modelo hidrológico superficial son:

- 1) Hmax: humedad máxima.
- 2) C: coeficiente de escurrimiento.
- 3) Imax: Infiltración máxima.
- 4) Alfa: Movimiento del agua en la celda subterránea.

En este modelo se considera que el suelo funciona como un almacenamiento con entradas provenientes de la precipitación y salidas debidas a la evapotranspiración, cierto volumen de agua excedente se proyecta como escurrimiento superficial y otra se infiltra y almacena en los sistemas acuíferos y fluye en ellos hasta desembocar en otro medio superficial.

El modelo opera realizando balances de humedad entre los distintos procesos de transporte de agua que tienen lugar en un sistema hidrológico durante las diferentes fases del ciclo hidrológico. Todo el proceso está gobernado por el principio de continuidad y de balance de masas, y regulado por leyes específicas de reparto y transferencia entre los distintos términos del balance (Arquiola, 2017).

En la siguiente figura se representa el ciclo hidrológico simulado.

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

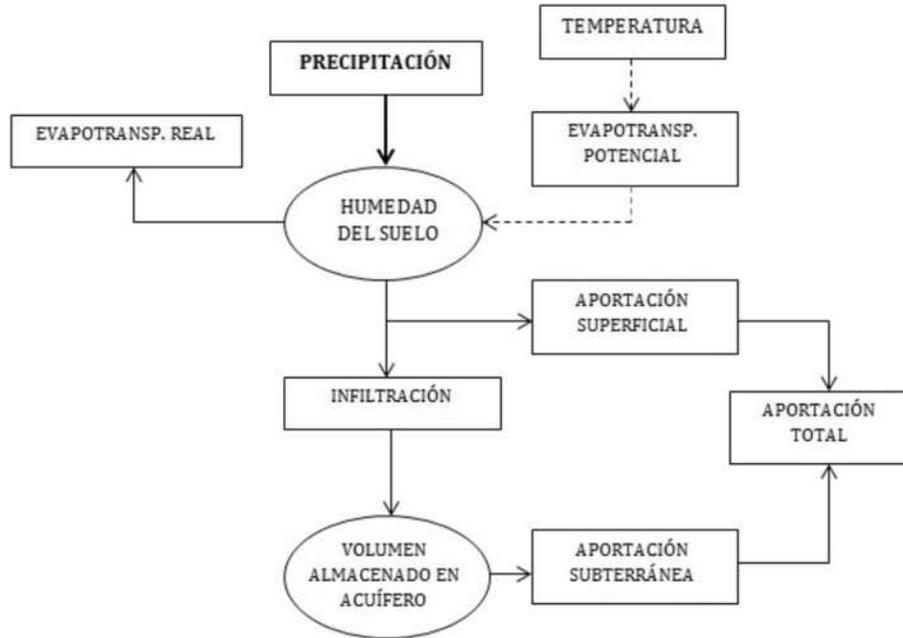


Figura 4. Representación del ciclo hidrológico del modelo Témez. Fuente. (Arquiola, 2017)

El reparto de flujos salientes e intermedios y de los almacenamientos intermedios, dependen del flujo entrante de precipitación. Se tiene como flujo de entrada la precipitación (P) [L]; los flujos de salida son: evapotranspiración real (E) [L], aportación superficial (A_{sup}) [L] y aportación Subterráneo (A_{sub}) [L]. 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 (Farfán, 2019).

El intervalo temporal que más se emplea en el modelo es el intervalo mensual, y este modelo considera el terreno dividido en dos zonas:

1. Zona superior: Zona en cuyos poros coexisten agua y aire, el contenido de agua es asimilable a la humedad del suelo y es una zona no saturada.
2. Zona inferior: También se le llama acuífero, y funciona como almacenamiento subterráneo que desagua al drenaje superficial, es una zona saturada.

Los distintos componentes de flujos y almacenamientos se presentan en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

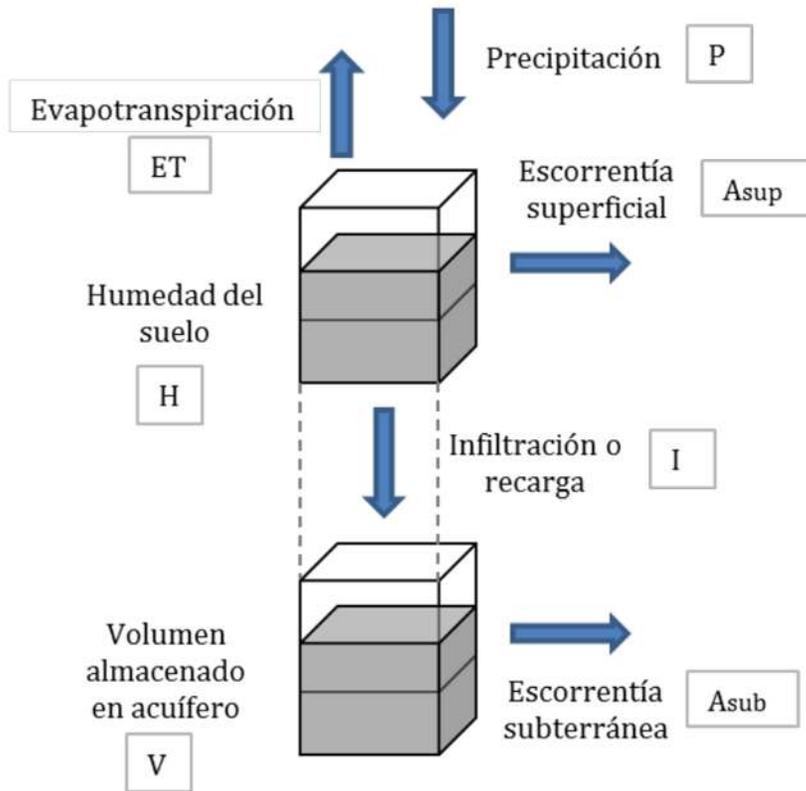


Figura 5. Esquema de flujos y almacenamiento del modelo témez. Fuente (Arquiola, 2017)

6.7.2. MÓDULO EVALHID

El programa EVALUACIÓN de los recursos HIDRICOS (EVALHID) es un modelo informático para el desarrollo de modelos de precipitación escorrentía (MPE) en cuencas complejas y con el objetivo de evaluar la cantidad de recurso hídrico que producen las mismas. El módulo consta de varios tipos de modelos que se pueden escoger en función de los datos disponibles, la complejidad de la cuenca y la práctica del usuario en el desarrollo y calibración de modelos hidrológicos. Todos los modelos disponibles son del tipo agregado con aplicación semi-distribuida. (Arquiola, 2017).

Para simular el proceso precipitación-aportación para un determinado periodo de tiempo, se requiere contar con algunos componentes del ciclo hidrológico (tales como precipitación, temperatura y evapotranspiración). Estos modelos hidrológicos arrojan resultados de escorrentía de una cuenca, que pueden representarse tanto mensuales como anuales que son comparados con los volúmenes circulantes registrados en una estación hidrométrica, considerando el mismo periodo de tiempo para la comparación (Farfán, 2019).

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

El módulo consta de varios tipos de modelos, entre ellos el modelo de Témex, que deben seleccionarse en función de los datos disponibles, la complejidad de la cuenca y experiencia del usuario en el desarrollo y calibración de modelos hidrológicos. Todos los modelos disponibles son del tipo agregado con aplicación semi-distribuida, en los que la cuenca a ser modelada se subdivide en subcuencas y en cada una de ellas se plantea uno de los modelos disponibles en el programa, para ello es necesario contar con datos de series temporales de precipitación, evapotranspiración potencial (ETP) y la superficie de las subcuencas. Es necesario disponer de datos aforados, restituidos a régimen natural, que permitan la calibración de los parámetros del modelo (Urbina, 2018).

En la Figura 6 mostraremos el esquema simplificado del funcionamiento del programa.

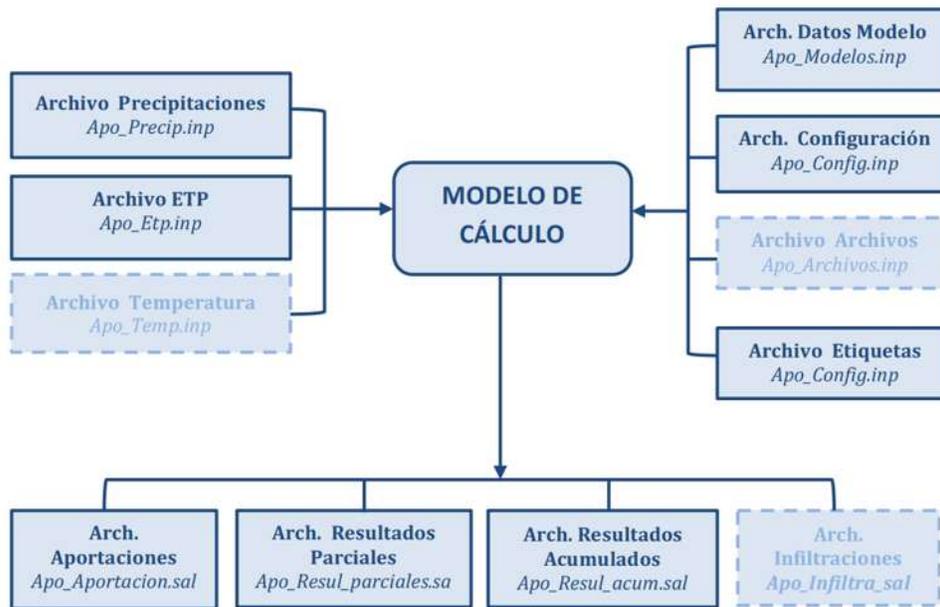


Figura 6. Estructura del programa Evalhid. Fuente (Arquiola, 2017)

Como se puede ver, es necesario un archivo de Datos del Modelo, otro de Configuración y otro de Etiquetas.

En los datos del modelo estará toda la información de los modelos que se van a desarrollar. En el archivo de la configuración contiene aspectos de factores de corrección de unidades. Dentro del archivo de etiquetas se encontrará la información sobre errores y otros avisos que el programa tiene para avisar al usuario sobre algunas posibles incidencias.

A la salida del programa se tendrán varios archivos como son los de resultados parciales, acumulados, aportaciones e 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 que se haya seleccionado. En el archivo de acumulado presenta la acumulación temporal de algunas variables. En el archivo de aportaciones recoge a la estaca temporal definida en la acumulación la esorrentía total acumulada en cada uno de los

puntos del desagüe superficial definido. En el archivo de infiltraciones recoge esas infiltraciones acumuladas temporalmente en los puntos de acumulación subterránea.

6.7.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO SUPERFICIAL

La elaboración del Modelo Precipitación Escorrentía (MPE) requiere de una calibración. Calibrar se refiere a ajustar los parámetros meteorológicos de una manera particular para cada sistema, esto se logrará modificando los valores numéricos de las ecuaciones de cada modelo.

El proceso de calibración consiste en lograr que los valores simulados obtenidos del modelo sean lo más similares a los valores observados o medidos en el mismo periodo de tiempo de la serie utilizada, para esto caso en el software de Evalhid se deben modificar los parámetros del modelo de Témez (Hmax, C, Imax y Alfa) que son los que influyen de manera directa con el comportamiento del escurrimiento superficial. Las modificaciones que se realicen deben ser congruentes y dentro de los rangos que por experiencia o con base en otros estudios se conozcan. Obtener una correcta calibración del modelo permitirá que los resultados sean fiables (Contreras, 2021).

Lo anterior se refiere a que para poder asemejar los valores reales (observados) que son los valores que se encuentran en la estación hidrométrica de la cual vamos a partir para generar las microcuencas, constará en realizar la calibración (lograr que la diferencia entre ambas series sea la mínima). El proceso de modelación hace necesario el establecer microcuencas dentro de la zona estudiada, estas pueden ser obtenidas por medio del sistema de información geográfica en la generación de orden de corriente y esto se hace de acuerdo a la posición de las estaciones hidrométricas. Para poder modelar adecuadamente el proceso de escurrimiento es fundamental conocer la precipitación que está recibiendo la zona de estudio, es por eso que se debe delimitar la zona de influencia que pertenece a las estaciones meteorológicas por medio de los polígonos de Thiessen ya antes mencionados.

Es posible discernir la influencia apropiada que tiene cada estación sobre las microcuencas, de tal forma que en aquellos casos en que se tengan más de una afectación para uno de los microsistemas se generen estaciones ficticias siguiendo el método de la distancia euclidiana al cuadrado ubicadas en su centro de gravedad a partir de los datos de las estaciones que están influyendo (Urbina, 2018).

Inicialmente, y para poder comenzar la calibración, el usuario debe definir previamente el número y nombre de los parámetros, sus límites superiores e inferiores, así como su valor inicial. También se puede modificar el número máximo de iteraciones y decidir si se quiere comenzar a calibrar con el valor inicial de los parámetros o no. Existe además la posibilidad de imponer los parámetros con los que se quiere lanzar el algoritmo (semilla, número de complejos, etc.) (Contreras, 2021).

Al realizar la calibración por medio de Evalhid se deberá especificar que parámetros de los que se han cargado se desean optimizar, y una vez especificada la información necesaria en el calibrador se ejecuta el algoritmo Shuffled Complex Evolution method developed at The University of Arizona (SCE-UA) para encontrar el conjunto de parámetros óptimos. Este algoritmo varía los parámetros del modelo en cada iteración y hace que el archivo principal del modelo se modifique.

El calibrador realiza una comparativa gráfica de las series de datos que simula el Evalhid, contra los datos observados clasificándolos de manera mensual, anual y año medio, en conjunto de la función objetivo para decidir si el ajuste que se realizó es el adecuado.

El SCE-UA posee las propiedades necesarias para lidiar con los problemas más comunes de optimización de modelos hidrológicos de cuenca: convergencia global ante la presencia de múltiples regiones de atracción; capacidad para evitar caer atrapado en pequeños hoyos y baches en la superficie de la función objetivo; solidez ante sensibilidades divergentes de parámetros e interdependencia de parámetros; no dependencia en la disponibilidad de una expresión explícita para la función objetivo o las derivadas; capacidad para manejar un gran número de parámetros (Contreras, 2021).

Hablar de una función objetivo es hablar de una ecuación que se emplea para obtener una media numérica de la diferencia entre la respuesta simulada por el modelo, esta función constituye uno de los elementos principales en los procedimientos de estimación automática de parámetros. El propósito de la calibración automática de modelos es, por tanto, “encontrar aquellos valores de los parámetros del modelo que optimicen (minimicen o maximicen, según el caso) el valor numérico de la función objetivo” (Paredes, 2013).

A continuación, se describen los indicadores de ajuste:

- **Coefficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS)**

El coeficiente de eficiencia de Nash (NE) es un error cuadrático medio que da mayor peso a los errores grandes, que a menudo, pero no siempre, suceden durante períodos de flujo elevado. El valor de NS varía de -1 a 1. Un valor de NS=1 significa que el ajuste es perfecto. Un valor de NS=0 significa que el error es del mismo orden de magnitud que la varianza de los datos observados, por lo que la media de los datos observados tendría una capacidad de predicción similar al modelo. Valores inferiores a cero implican que la media tiene una capacidad de predicción más alta que el modelo, lo que implica el mal funcionamiento del modelo (Contreras, 2021).

- **Nash-Sutcliffe modificado (Ln NS).**

Este indicador da mayor peso a los errores durante flujos escasos haciendo una transformación logarítmica. Mediante esta transformación logarítmica, los picos se disminuyen y los valores más bajos se mantienen.

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

El coeficiente Ln NS se calcula con valores logarítmicos de los valores observados y simulados. Mediante esta transformación logarítmica del flujo, los picos se achatan 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 NS a las sobre o infravaloraciones sistemáticas del modelo (Contreras, 2021).

Los rangos para determinar la calidad de la modelación se presentan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

- **Coefficiente de correlación de Pearson**

El coeficiente de Correlación de Pearson (r^2) mide la covariabilidad de valores observados y simulados sin penalización por sesgo. El valor de este coeficiente varía entre -1 y 1 . Cuando el coeficiente r^2 toma el valor de 1 se tiene una correlación completa positiva; es decir, todos los datos describen una línea recta con pendiente positiva (Urbina, 2018).

El coeficiente de Pearson tiene el inconveniente que es un estadístico pobre para decidir si la correlación observada es estadísticamente significativa, y/o si una correlación observada es significativamente más fuerte que otra (Contreras, 2021).

Los rangos para determinar la calidad de la modelación se presentan en la Tabla 3

Tabla 3. Rangos de ajustes

Calidad de ajuste	NSE	r^2
Muy buena	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$0.90 < r^2 \leq 1.00$
Buena	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$0.75 < r^2 \leq 0.89$
Satisfactoria	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$0.50 < r^2 \leq 0.74$
No satisfactoria	$NSE \leq 0.50$	$r^2 \leq 0.50$

CARACTERIZACIÓN DEL ACUÍFERO CON MODFLOW

Processing Modflow for Windows es un software de código libre desarrollado en Fortran por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), que puede ser descargado, instalado y de uso libre.

Modflow utiliza el método de las diferencias finitas, el cual consiste en un código fuente que resuelve mediante iteraciones la ecuación de flujo subterráneo. Determina cuáles son las condiciones de flujo subterráneo y su interacción con el agua superficial (Pérez, 2021).

El movimiento tridimensional del agua subterránea con una densidad constante a través de un material poroso puede ser descrito por la siguiente ecuación diferencial parcial (Harbaugh, 2005)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = Ss \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde:

- (K_{xx}) , (K_{yy}) , y (K_{zz}) son los valores de conductividad hidráulica en los ejes coordenados, x, y, z.
- h se refiere a la altura piezométrica.
- W es un valor de flujo volumétrico por unidad de volumen y representa fuentes o sumideros ($W < 0$ es el flujo de salida del sistema de aguas subterráneas y $W > 0$ es el flujo de entradas al mismo).
- Ss indica el almacenamiento específico del material poroso.
- t es el tiempo.

6.8. DISCRETIZACIÓN DEL ACUÍFERO

Modflow utiliza una malla centrada en bloques, en la que el modelo calcula el centro de cada celda tomándolo como un nodo, por lo que será necesario contar con una discretización del acuífero en la malla para poder realizar la simulación dentro del programa.

El sistema acuífero se discretiza en la malla de bloques o celdas, cuya ubicación de los mismos se describe en términos de filas, columnas y capas, como se muestra en la Figura 7, utilizando una notación de índice [J, I, K] para localizar las celdas.

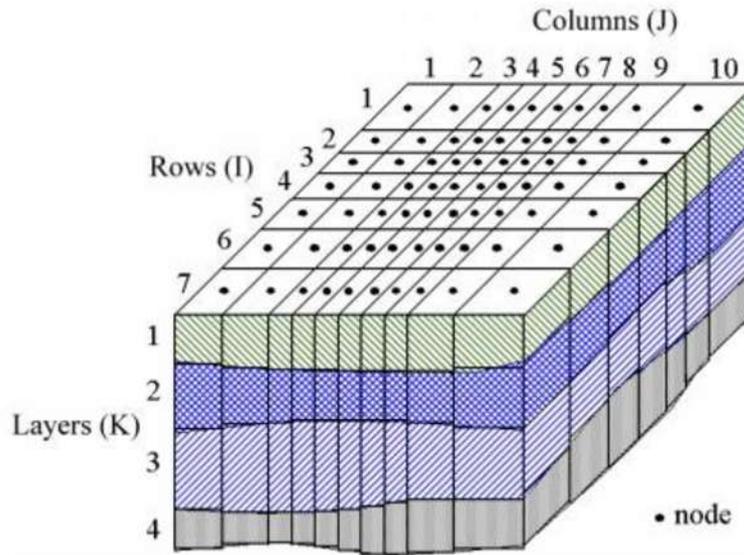


Figura 7. Discretización del acuífero. Fuente: (Chiang y Kinzelbach, 1998)

Para poder presentar los acuíferos en modflow son necesarias una serie de mallas divididas en 3 bloques con la siguiente información:

- Características del acuífero

Se definen las celdas que estarán activas, las celdas inactivas y las celdas de nivel constante Figura 8. Se define el espesor del acuífero, y al final se añade lo que son los niveles estáticos que representan la altura sobre el nivel del mar a la que se encuentra el acuífero.

- Características del suelo

Se presentan las condiciones del suelo, las podrán definir el movimiento del agua subterránea a través del medio poroso. Para definir estas mallas se hace uso de mapas e información geológica y litológica. En base a esos mapas se proponen distintos rangos de valores para las propiedades del suelo como son la conductividad hidráulica y la porosidad Tabla 4 y Tabla 5.

- Acciones elementales

Estas acciones representan las entradas y salidas de agua del acuífero. Las extracciones por pozos de bombeo al igual que el aprovechamiento de manantiales. Las concesiones vienen con el nombre del titular además del volumen concesionado anualmente.

La recarga estará definida por la precipitación en la zona y las características del suelo esta recarga se hizo por medio de un balance hídrico (Módulo Evalhid)

6.9. OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN PARA MODFLOW

Modflow se alimenta de matrices que se forman por las filas y las columnas que corresponden a la malla, por lo que estas matrices son extraídas de las diferentes características influyentes en el acuífero que son realizadas en el sistema de información geográfica.

Luego de extraer las matrices del sistema de información geográfica procedemos a abrirlas en Excel.

Los mallados o matrices necesarias para el modelo de Modflow son:

1. Condiciones de entorno: la información de esta matriz se conforma con base en la variable IBOUND la cual se va a describir posteriormente.
2. Relieve: se basa en un modelo de elevaciones que contiene las elevaciones en el terreno, y la información se asigna celda por celda.
3. Capa inferior: se realiza restando el espesor del acuífero a las elevaciones del relieve en cada celda.
4. Extracciones: volúmenes concesionados de los pozos de extracción, con valor negativo.
5. Elevación del nivel estático: datos de nivel estático que tengan los pozos en el acuífero
6. Conductancia: volumen del manantial (0.075)
7. Conductividad: es la propiedad del acuífero en la que se describe qué tan fácilmente pasa el agua a través de sus poros en una unidad de tiempo, esta matriz la van a conformar valores propuestos teóricamente por varios autores que vamos a presentar en la siguiente tabla, estos valores se basan en la geología de la zona y es una de las características más importantes en el sistema del acuífero.

Tabla 4. Valores estimados de la conductividad hidráulica (metros/día)

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

Valores estimados de la conductividad hidráulica (metros /día)

Materiales no consolidados	Schwartz	Domenico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Grava	49 a 183	25 a 2500	100 a 10 ⁶	100 a 10 ⁶	10 a 1000	
Grava con arena						
Arena gruesa	24 a 41	0,1 a 500			1 a 100	1 a 100
Arena media	20 a 29	0,1 a 50	0,01 a 1000	1 a 1000		
Arena fina	8 a 16	0,02 a 20			0,01 a 1	
Arena arcillosa	6 a 29			0,01 a 100	0,001 a 0,1	0,01 a 1
Silt, loess	0,3 a 1,2	10 ⁻⁴ a 2	10 ⁻⁴ a 1	10 ⁻⁴ a 1	0,001 a 0,1	10 ⁻⁴ a 1
Arcilla	3 *10 ⁻⁴	10 ⁻⁶ a 4*10 ⁻⁴	10 ⁻⁷ a 10 ⁻³		10 ⁻⁴ a 10 ⁻³	10 ⁻⁶ a 10 ⁻³
Arcilla marina inalterada		10 ⁻⁷ a 2*10 ⁻⁴		10 ⁻¹¹ a 10 ⁻⁷		
Rocas sedimentarias						
Calizas carstificadas		0,1 a 2000	0,05 a 0,5	0,1 a 1000		0,1 a 10 ⁷
Calizas, dolomías		10 ⁻⁴ a 0,5	0,001 a 0,5	10 ⁻⁴ a 1		10 ⁻⁴ a 1
Areniscas		3*10 ⁻⁵ a 0,5	10 ⁻⁵ a 1	10 ⁻⁵ a 1		
Argilitas (siltstone)		10 ⁻⁶ a 0,001				
Pizarras sedimentarias (Shale) intactas		10 ⁻⁸ a 2*10 ⁻⁴	10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸		10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸
Pizarras sed. (Shale) fracturadas/alteradas			10 ⁻⁴ a 1			
Rocas cristalinas						
Basalto inalterado, sin fracturar			10 ⁻⁶ a 10 ⁻³			10 ⁻⁶ a 10 ⁻³
Basalto fracturado/vesicular cuaternario			10 a 1000			0,1 a 10 ⁶
Escorias basálticas			0,001 a 1000			
Basalto permeable		0,03 a 2000		0,02 a 1000		
Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar		10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵		10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas		0,001 a 25	10 ⁻⁵ a 1	0,0005 a 20		10 ⁻⁵ a 1
Granito alterado		0,3 a 5				
Gabro alterado		0,05 a 0,3				

8. Porosidad: estará en función del material que constituye el acuífero y la capacidad de la roca para albergar el agua, la tabla siguiente muestra los valores teóricos propuestos para esta matriz, se basan principalmente en la geología presente en la zona de estudio.

Tabla 5. Valores estimados de la porosidad (%)

Valores estimados de la porosidad (%), según Sanders (1998)

	total	eficaz
Arcillas	40 a 60	0 a 5
Limos	35 a 50	3 a 19
Arenas finas, arenas limosas	20 a 50	10 a 28
Arena gruesa o bien clasificada	21 a 50	22 a 35
Grava	25 a 40	13 a 26
Shale intacta	1 a 10	0,5 a 5
Shale fraturada/alterada	30 a 50	
Arenisca	5 a 35	0,5 a 10
Calizas, dolomías NO carstificadas	0,1 a 25	0,1 a 5
Calizas, dolomías carstificadas	5 a 50	5 a 40
Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	0,01 a 1	0,0005
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	1 a 10	0,00005 a 0,01

6.9.1. TIPOS DE CELDAS

En Modflow, se utilizan tres tipos de celdas para definir las condiciones de contorno del acuífero las cuales son las celdas de nivel constante, celdas activas y celdas inactivas. Las celdas de nivel constante son aquellas para las que se especifica el nivel de inicio y se mantiene constante en toda la simulación, en este tipo de celdas se especifica en donde se encuentran cuerpos de agua dentro del. Las celdas inactivas son en las que no se contorno del acuífero. Las celdas activas son en las que no se tiene un nivel establecido, es decir, que puede no existir un nivel definido, pero en un determinado tiempo puede variar dicho nivel a lo largo de la simulación permite una entrada o salida de flujo en ningún momento de la simulación (Pérez, 2021).

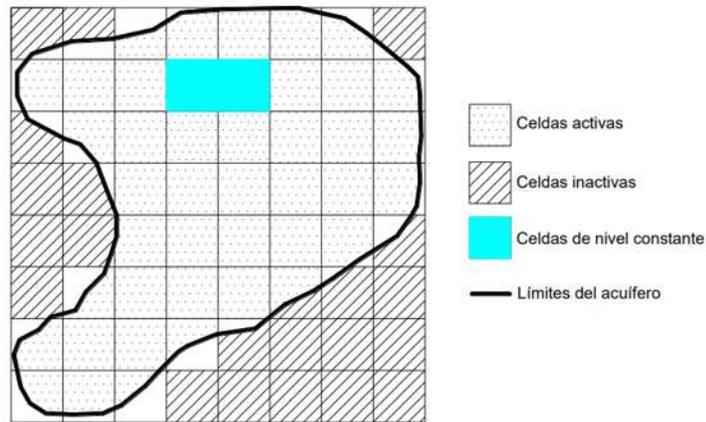


Figura 8. Tipos de celdas para Modflow. Fuente: (W.Harbaugh, 2005)

7. RESULTADOS

A continuación, se presentarán y analizarán los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta tesis.

7.1. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para lograr la caracterización de la zona de estudio se utilizaron softwares de sistemas de información geográfica para el manejo y generación de información espacial referente a los acuíferos de Zamora y Cotija.

Los acuíferos que se analizaron en este estudio son el acuífero con clave 1608 Zamora, y el acuífero con clave 1622 Cotija que se encuentran dentro del estado de Michoacán.

El uso de modelos digitales, así como las diferentes capas de información espacial utilizadas en el SIG permite ubicar la zona de estudio generando distintos mapas de los acuíferos estudiados.

En la Figura 9 se muestra aparte de la ubicación geográfica de la zona de estudio, a los acuíferos, los cuales se encuentran en la región oeste del país, dentro del estado de Michoacán, el acuífero de Cotija se encuentra en el límite con el estado de Jalisco, por lo que podemos denotar que se encuentra en la porción occidental del estado, mientras que la zona hidrogeológica de Zamora se encuentra más ubicada a la porción nororiental del estado.

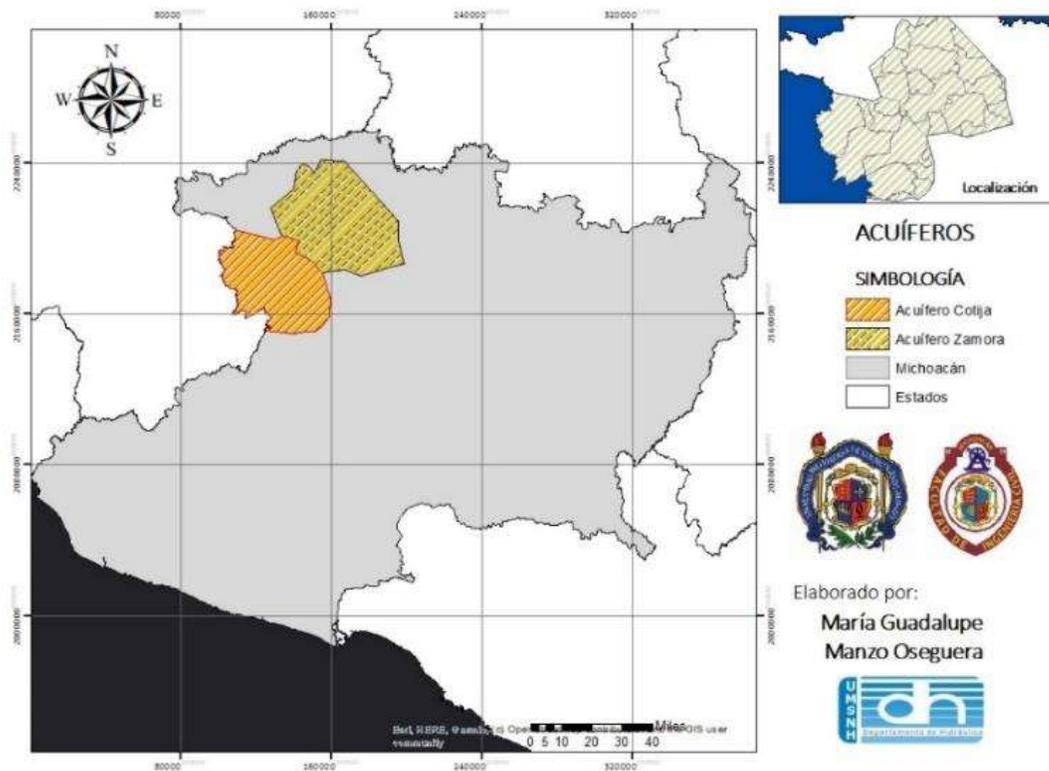


Figura 9. Ubicación de los acuíferos Zamora y Cotija.

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

Es de gran importancia conocer la ubicación hidrológica, por lo que, con respecto a la administración de los recursos hídricos en el país, los acuíferos pertenecen a las regiones hidrológicas Lerma-Santiago y Balsas (Figura 10).

El acuífero Zamora (1608) se encuentra en la región hidrológica No.12 (Lerma-Santiago) en la cuenca del lago de Chapala y ocupa las porciones alta y media de la subcuenca del Río Duero. Mientras que el acuífero de Cotija (1622) se encuentra en la región hidrológica No.18 (Balsas) en la cuenca del río Tepalcatepec y la subcuenca del río Itzícuaru.

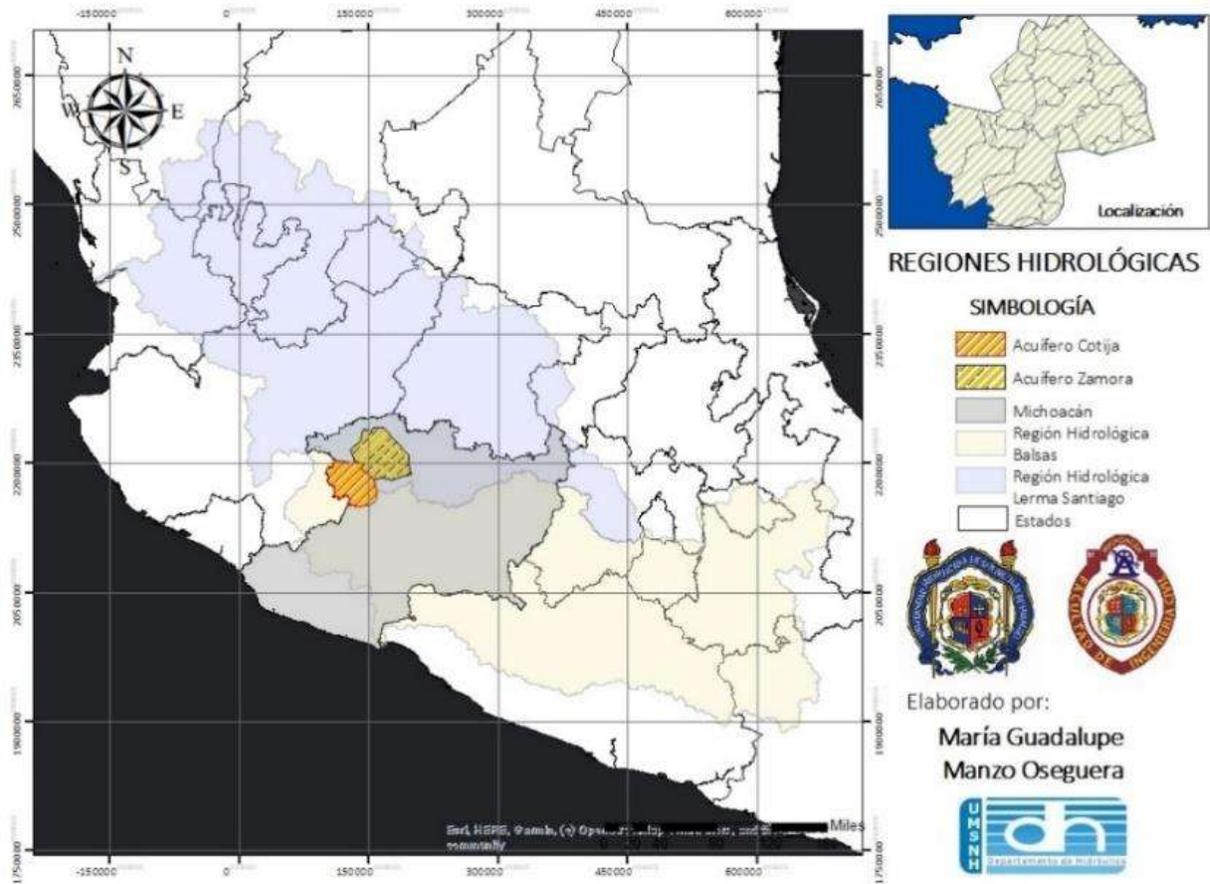


Figura 10. Regiones hidrológicas de los acuíferos en estudio.

A partir de la zona de estudio delimitada por los acuíferos, se obtiene el mapa de municipios que tienen influencia sobre ella; de esta forma, como se muestra en la Figura 11, se tienen en total 24 municipios en la zona, 14 municipios en el acuífero de Zamora y 10 restantes en el acuífero de Cotija Tabla 6, todos ubicados en el estado de Michoacán.

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

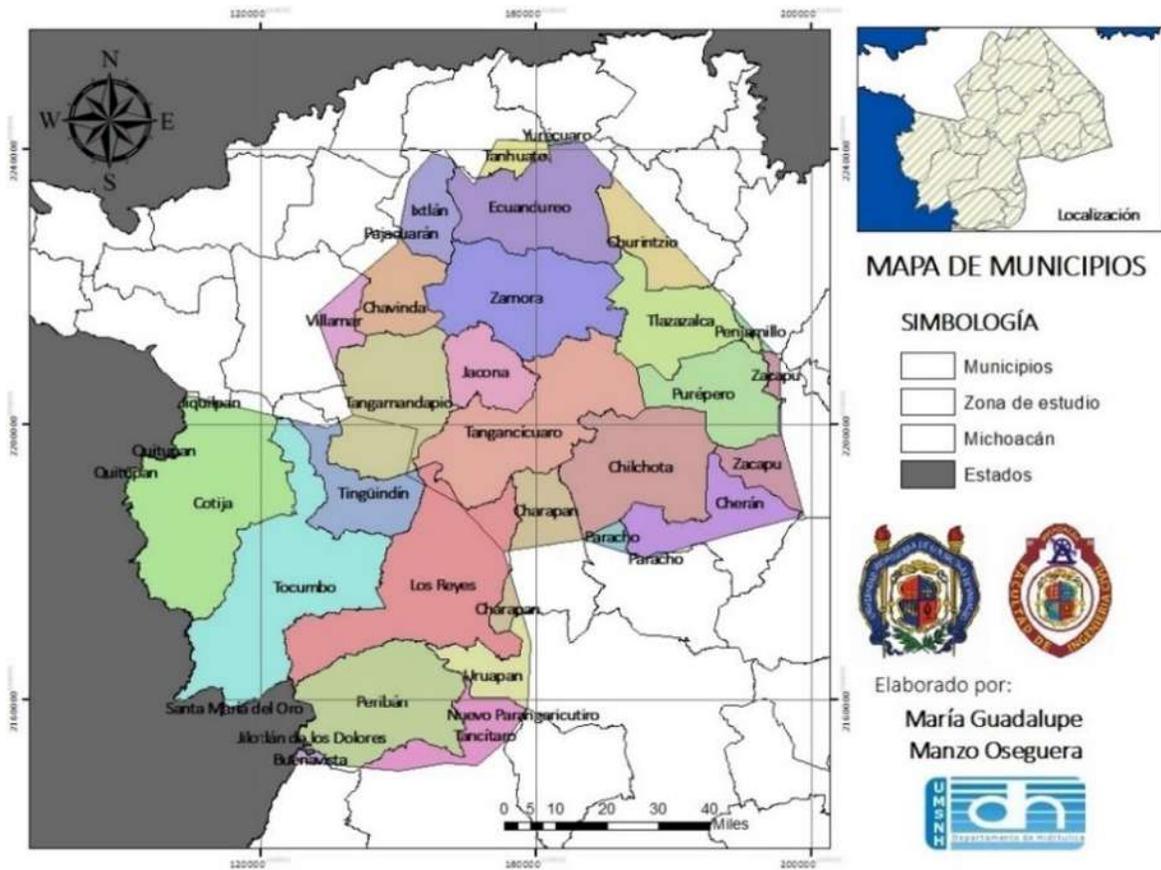


Figura 11. Municipios comprendidos dentro de la zona de estudio.

Tabla 6. Municipios correspondientes a cada acuífero.

ACUIFERO DE ZAMORA	ACUIFERO DE COTIJA
1. Charapan	1. Cotija
2. Nahuatzen	2. Charapan
3. Chavinda	3. Nuevo Parangaricutiro
4. Purépero	4. Peribán
5. Cherán	5. Los Reyes
6. Chilchota	6. Tancítaro
7. Churintzio	7. Tangamandapio
8. Tlazazalca	8. Tangancícuaro
9. Ecuandureo	9. Tingüindín
10. Villamar	10. Tocumbo
11. Ixtlán	
12. Zamora	
13. Zacapu	
14. Jacona	

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

El acuífero denominado “Cotija 1622”, se encuentra ubicada en la porción occidental del Estado de Michoacán. Colinda al norte con los poblados: Los Laureles, Tumbiscatio, Paredones, Coameo, Aquiles Serdán, Los Hucuares, La Cantera, Guarachanillo y al sur con El Pilón, La Soledad y Zirimindiro; al este con Patamban, San Isidro, Charapan, Corupo, San Lorenzo y Nuevo San Juan Parangaricutiro; al oeste con el estado de Jalisco. Forma parte de la cuenca del Río Tepalcatepec y de la subcuenca del Río Itzicuaro, estando integrada en la región Hidrológica N° 18 Río Balsas, más, sin embargo, la zona correspondiente al acuífero de “Zamora 1608”, se encuentra ubicada en la porción nororiental del Estado de Michoacán. Colinda al norte con los poblados La Luz, Ixtlán de los Hervores, Colesio, Ecuandureo y Churintzio; y al sur con Charapan, Nurio, Paracho de Verduzco, Cheranzicurin y Cherán; al este con Aguanato, Caurio de Guadalupe y Eréndira; y al oeste con Ciénega de Chapala, Pajacurán, Cerrito Colorado, San Antonio Guaracha y Aquiles Serdán, este acuífero ocupa las porciones alta y media de la subcuenca del Río Duero.

En la Figura 12, se determinó el relieve de la zona de estudio, cuyas elevaciones varían de 559 a 3822 msnm siendo la parte más baja el límite con jalisco en los municipios de Cotija, Peribán y Tocombo.

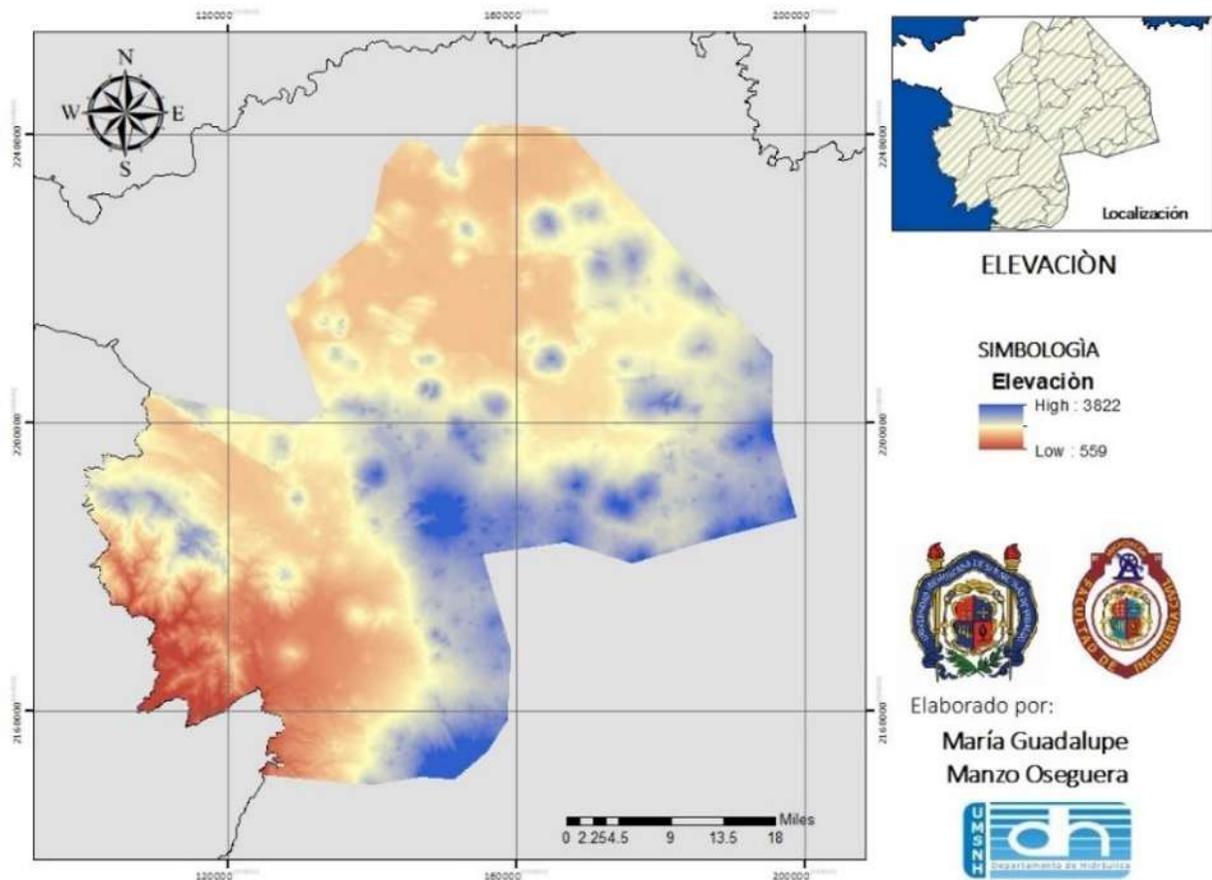


Figura 12. Elevaciones dentro de los acuíferos estudiados.

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

Los acuíferos cuentan con una red de drenaje, constituido en su mayoría por corrientes intermitentes las cuales provienen de los parteaguas de la cuenca que tienen una elevación máxima aproximada de hasta los 3822 m.s.n.m. (ver Figura 13).

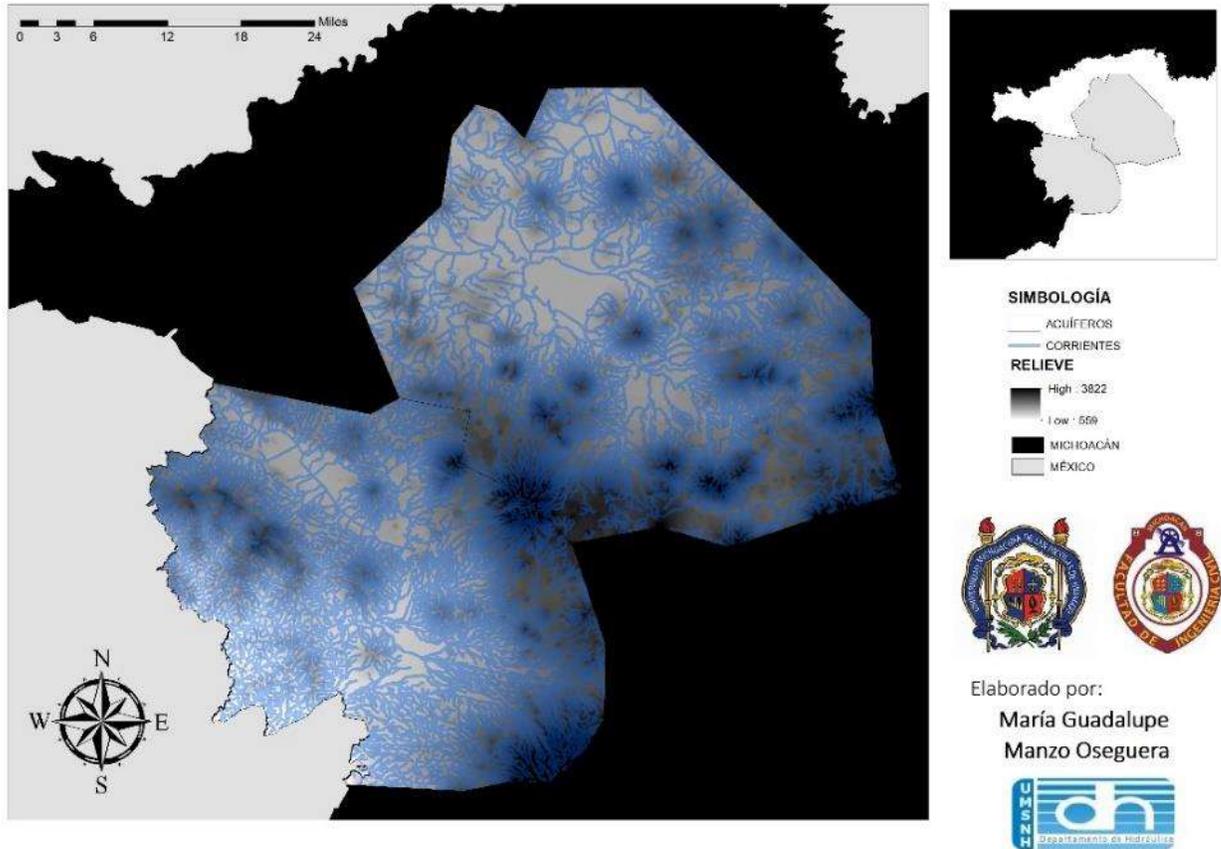


Figura 13. Sistema de corrientes de la zona de estudio.

Se distingue en la Figura 14 que el área agrícola es uno de los principales usos del suelo de la región, seguido del área agrícola pastizal y bosque, en los límites con el estado de Jalisco encontramos una porción de selva. Sin embargo, tienen una similitud muy buena entre ambos acuíferos referente al tipo de suelo, ya que en ambos acuíferos lo predominante es el área agrícola ya mencionada anteriormente.

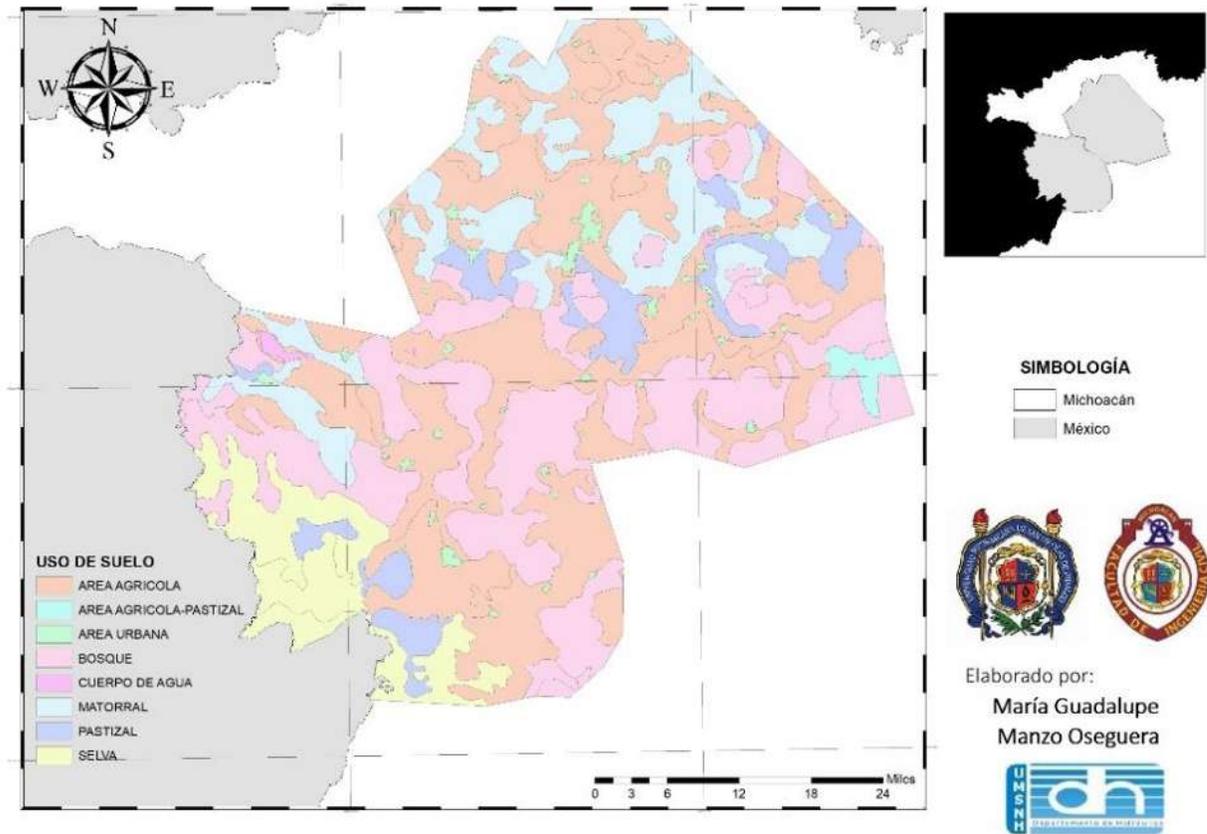


Figura 14. Uso de suelo en la zona de estudio

Se elaboró también un mapa de tipo de suelo para determinar las características que puede presentar la zona de estudio (Figura 15). Con respecto a los tipos de suelo, se distingue la presencia en mayor área de Cambisol que es un suelo que por lo general se pueden explotar para la agricultura, son suelos que se forman sobre materiales de textura media a fina bajo cualquier condición climática, topográfica y de cubierta vegetal. También tienen presencia los acrisoles y vertisoles, que son considerados como suelos con una textura fina, los acrisoles son suelos muy susceptibles a la erosión y mayormente se presenta en zonas forestales, los vertisoles son suelos con alta susceptibilidad a la salinización y con muy poca erosión.

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

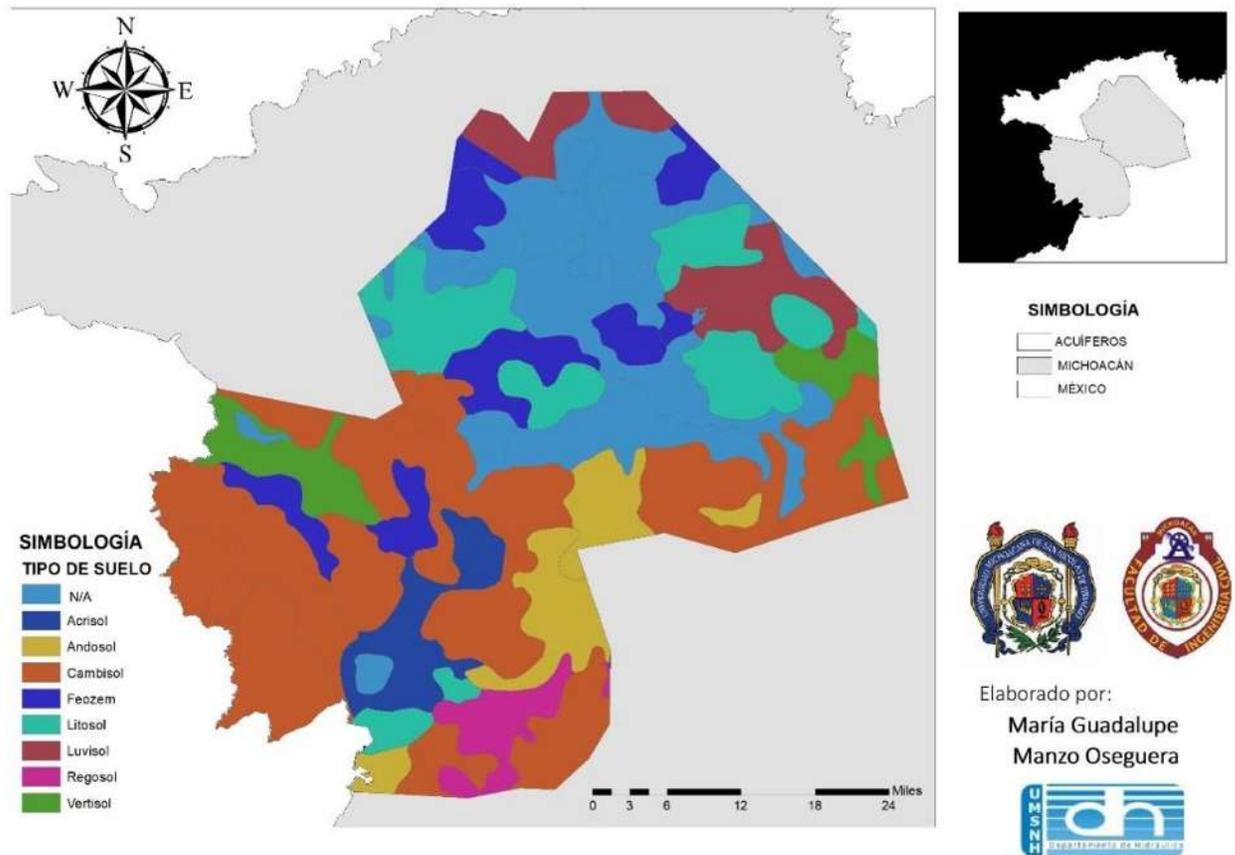


Figura 15. Tipo de suelo en los acuíferos estudiados.

De acuerdo a la cartografía se muestra que la geología de manera general tiene una composición donde las ígneas extrusivas básicas predominan en la mayor área de ambos acuíferos, y otra gran zona no cuenta con la información geológica, características que pueden observarse en la Figura 16

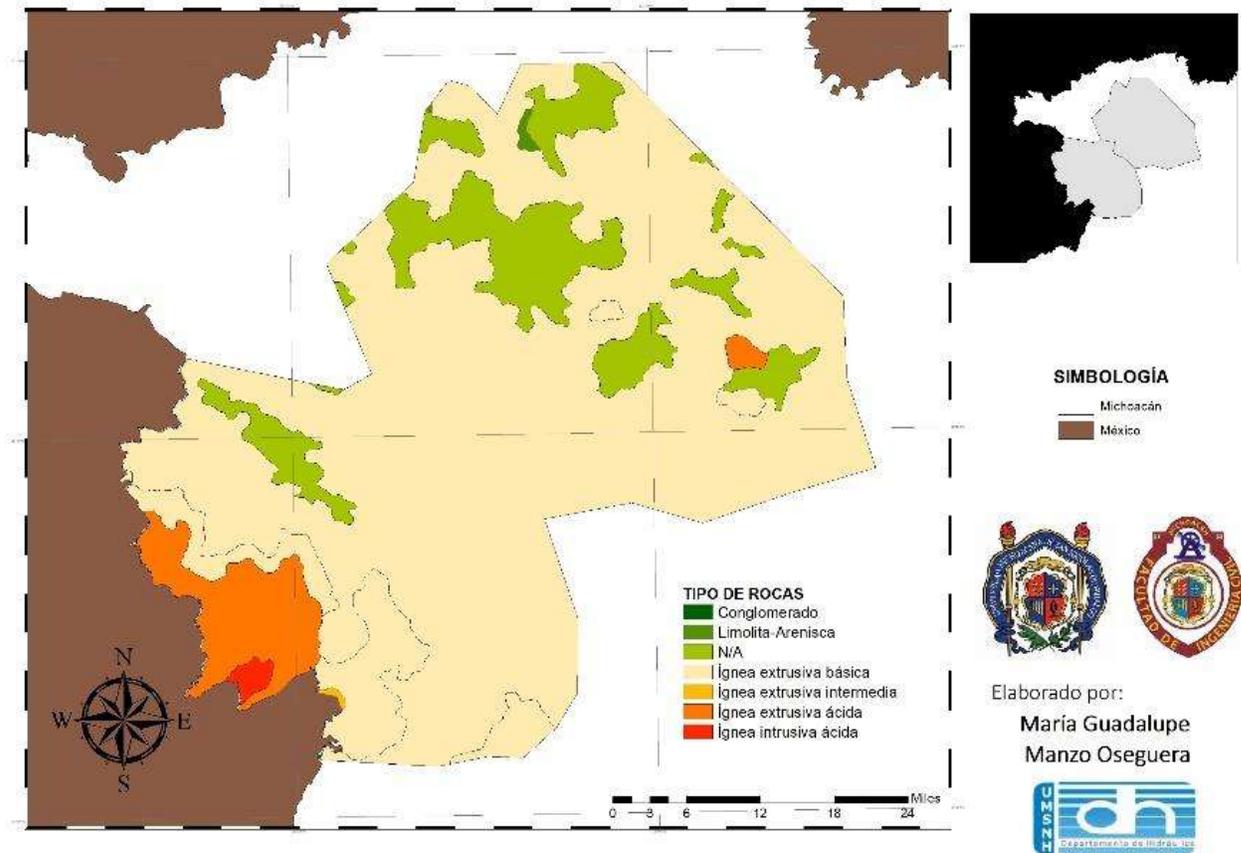


Figura 16. Geología presente en los acuíferos estudiados.

En la zona de estudio prevalece los climas (Figura 17). El clima del tipo A son climas muy poco variables durante el transcurso del año. Las temperaturas son altas, con focos de calor intensos en determinadas regiones, pero con una presencia de lluvias en todo el territorio, mientras que en los climas de tipo C, las estaciones del año influyen mucho en cuanto a sus temperaturas. En regiones donde se presentan este tipo de climas, los vientos huracanados son normales.

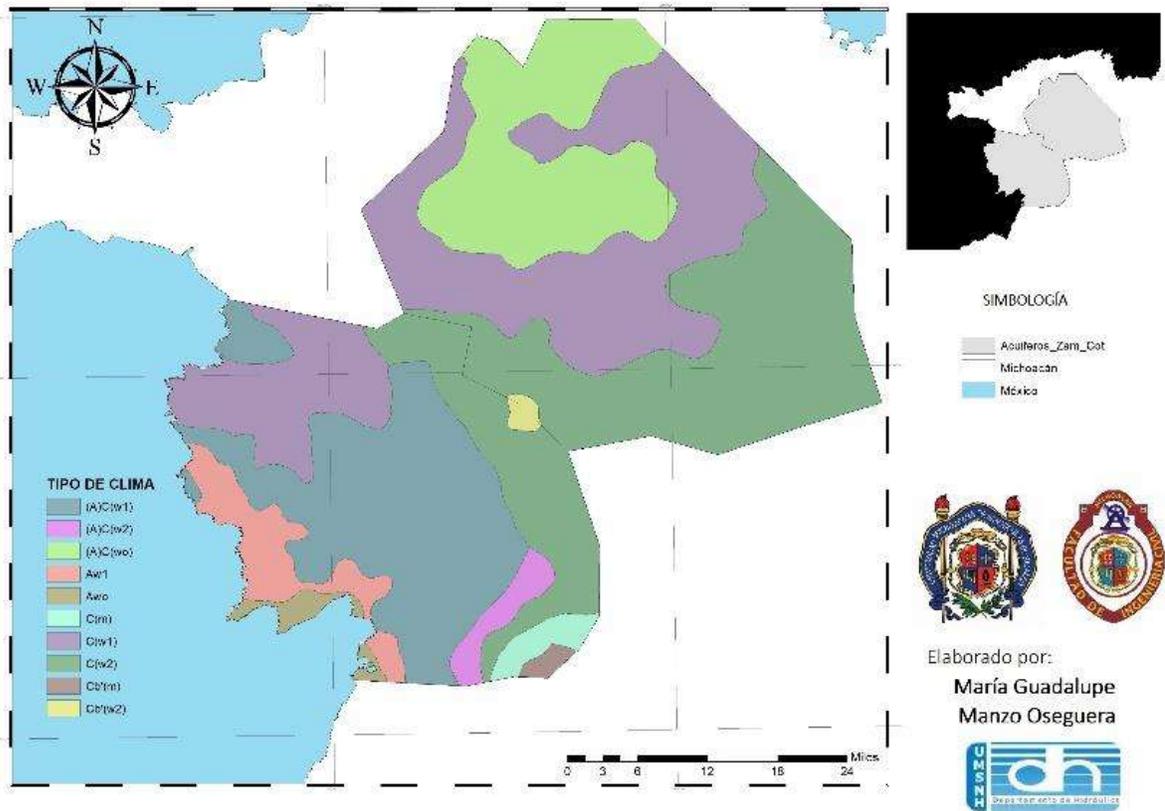


Figura 17. Tipos de clima dentro de la zona de estudio.

7.2. RECOPIACIÓN DE DATOS

7.2.1. ESTACIONES METEREOLÓGICAS

A partir de la base de datos de CLICOM las estaciones meteorológicas que formaron parte del estudio fueron identificadas espacialmente a través del uso de SIG, teniéndose un total en la zona de influencia de 115 estaciones que fueron verificadas y validadas (Figura 22).

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

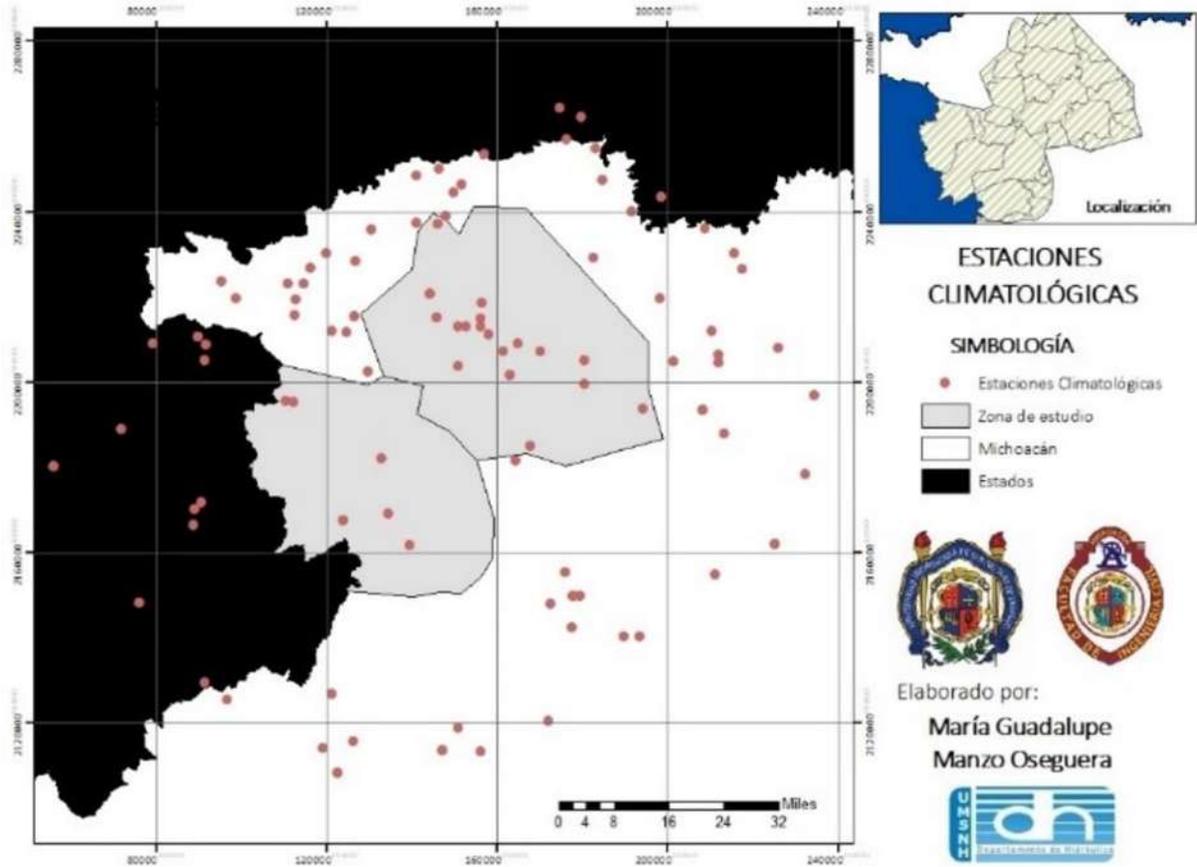


Figura 18. Estaciones Meteorológicas iniciales para la zona de estudio.

De las estaciones seleccionadas se realizará una discretización con el fin de identificar cuales proporcionarán una adecuada descripción de precipitación y temperatura dentro del área de la cuenca

Posterior a tener identificadas las 115 estaciones se procede a hacer la discretización y selección de estaciones principales a través de los siguientes criterios, que la menos tengan más de 25 años efectivos, con un % de vacíos que sea menor al 15%, es muy importante considerar que la estación este operando para que pueda tomarse en cuenta, y también que su último año de registro sea el 2009.

Luego de esta discretización se pudieron descartar un total de 103 estaciones, quedándonos así con un total de 12 estaciones con buena información las cuales se denominarán como estaciones principales (Figura 19).

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

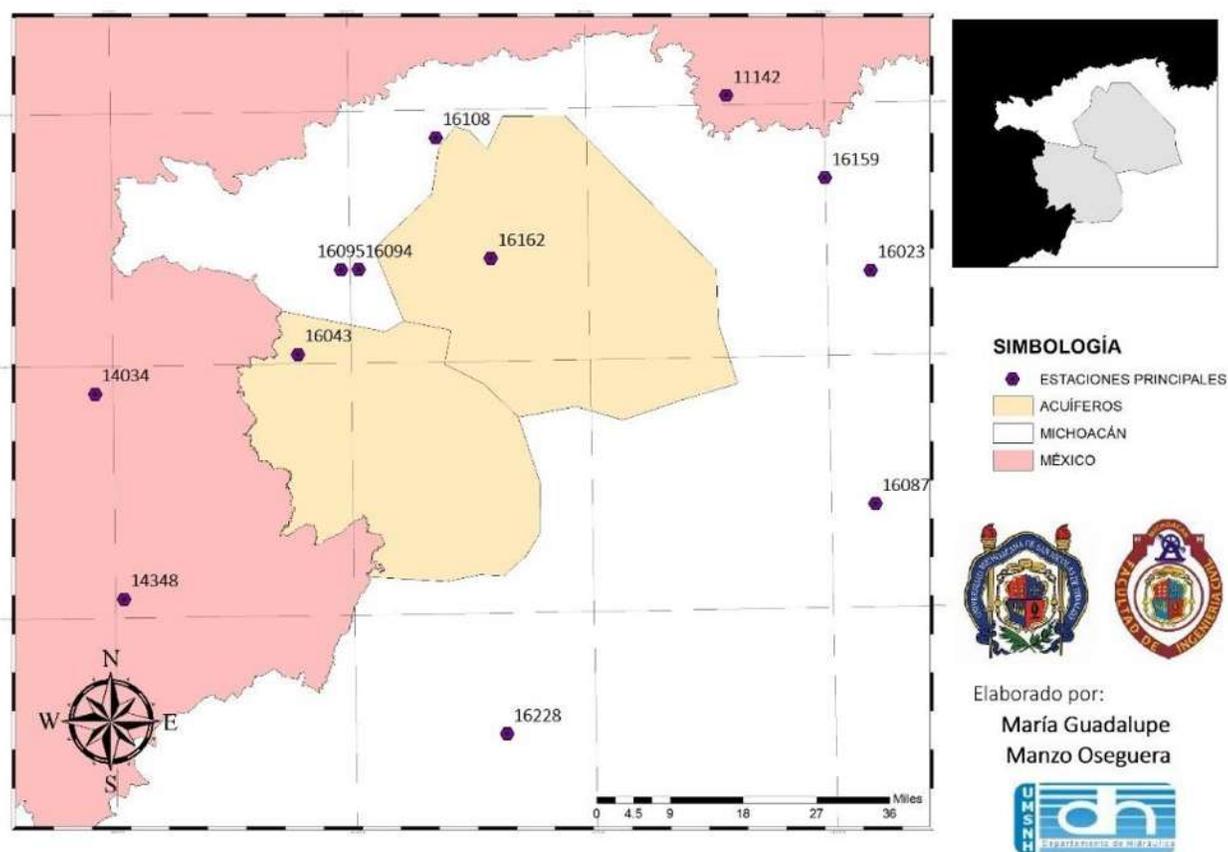


Figura 19. Estaciones meteorológicas principales en la zona de estudio.

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas estadísticas aplicadas (Tabla 7).

Tabla 7. Resultados de las pruebas de Homogeneidad y límites de Anderson.

N° ESTACION	CODIGO	PRUEBAS				LÍMITES DE ANDERSON
		SECUENCIAS	HELMERT	T-STUDENT	CRAMER	
1	16159	HOMOGENEA	NO HOMOGENEA	NO HOMOGENEA	HOMOGENEA	INDEPENDIENTE
2	11142	HOMOGENEA	NO HOMOGENEA	NO HOMOGENEA	HOMOGENEA	INDEPENDIENTE
3	14348	NO HOMOGENEA	NO HOMOGENEA	NO HOMOGENEA	HOMOGENEA	INDEPENDIENTE
4	14034	HOMOGENEA	HOMOGENEA	HOMOGENEA	NO HOMOGENEA	INDEPENDIENTE
5	16087	HOMOGENEA	NO HOMOGENEA	NO HOMOGENEA	HOMOGENEA	INDEPENDIENTE
6	16023	HOMOGENEA	NO HOMOGENEA	HOMOGENEA	HOMOGENEA	INDEPENDIENTE
7	16043	HOMOGENEA	NO HOMOGENEA	HOMOGENEA	HOMOGENEA	INDEPENDIENTE
8	16228	HOMOGENEA	HOMOGENEA	NO HOMOGENEA	NO HOMOGENEA	INDEPENDIENTE
9	16095	HOMOGENEA	NO HOMOGENEA	HOMOGENEA	HOMOGENEA	INDEPENDIENTE
10	16094	HOMOGENEA	NO HOMOGENEA	HOMOGENEA	HOMOGENEA	INDEPENDIENTE
11	16162	HOMOGENEA	NO HOMOGENEA	HOMOGENEA	HOMOGENEA	INDEPENDIENTE
12	16108	HOMOGENEA	HOMOGENEA	HOMOGENEA	HOMOGENEA	INDEPENDIENTE

En la (Tabla 7) se puede apreciar que la mayoría de las estaciones cumplen con todas las pruebas algunas otras no pasaron una prueba de homogeneidad, en esta parte es donde se debe establecer un criterio de aceptación, en este caso se optó por tomar un criterio

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

moderado ya que se permitió que las estaciones puedan fallar máximo en dos pruebas de homogeneidad y no podían fallar en ninguna de las otras pruebas (Independencia) si alguna estación fallaba tres pruebas de homogeneidad, alguna de independencia, la estación sería descartada. La razón principal por la que se tomaron estas decisiones y criterios es porque México no cuenta con buena información climatológica.

En la Tabla 8 se muestran las estaciones meteorológicas que fueron seleccionadas para ser llenadas con los datos de las 12 estaciones restantes:

Tabla 8. Información de estaciones principales

Numero	CODIGO	NOMBRE	X	Y	ALTITUD
1	16159	EL ROSARIO, MICH	217664.3068	2224834.711	1700
2	11142	EL CUBO, GTO	301601.5081	2245821.436	1738
3	14348	JILOTLAN, JAL	710025.1647	2146305.459	740
4	14034	CONTLA, JAL	688550.1333	2190353.04	1160
5	16087	PATZCUARO, MICH	227104.7088	2158220.717	2140
6	16023	COPANDARO DE GALEANA, MICH	269679.7432	2201920.989	1840
7	16043	EL PUERTO, MICH	740944.6278	2190988.333	1640
8	16228	ACAHUATO, MICH	784087.717	2114083.721	227
9	16095	PRESA JARIPO, MICH	751109.1851	2213280.804	1587
10	16094	PRESA GUARACHA, MICH	751109.1851	2213280.804	1580
11	16162	ORANDINO, MICH	782514.7636	2213759.18	1580
12	16108	SAN CRISTOBAL, MICH	771699.9441	2235743.234	1530

Las pruebas de independencia (Límites de Anderson) aplicadas a una de las estaciones principales se muestra a continuación.

Tabla 9. Límites de Anderson y coeficiente de auto correlación para la estación meteorológica con clave 11142.

Desfaces	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
§	-0.0391125	-0.0484428	0.0549201	-0.0703721	0.04904704	0.05799634	0.03226041	-0.0935051	0.08732272	0.27605345	0.00421877	0.08166305
LimINF	-0.3551047	-0.3662859	-0.3785601	-0.3921153	-0.4071881	-0.42408	-0.4431833	-0.4650184	-0.4902935	-0.52	-0.5555766	-0.599203
LimSUP	0.29796188	0.30567983	0.31404394	0.32314983	0.33311401	0.34407999	0.35622673	0.36978031	0.3850303	0.40235294	0.42224323	0.44535686

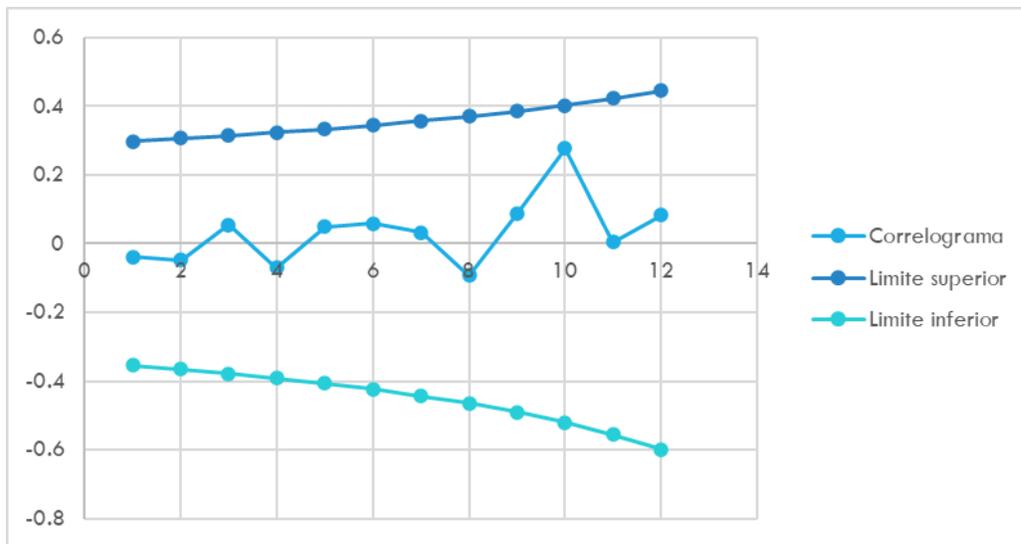


Figura 20. Correlograma de estación 11142 mostrando la independencia temporal de acuerdo a los límites de Anderson

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

Con ayuda los polígonos de Thiessen se corroboraron que las 12 estaciones principales lograran cubrir toda la zona de estudio, la información con la que cuentan es a partir del año 1980 y hasta el 2014.

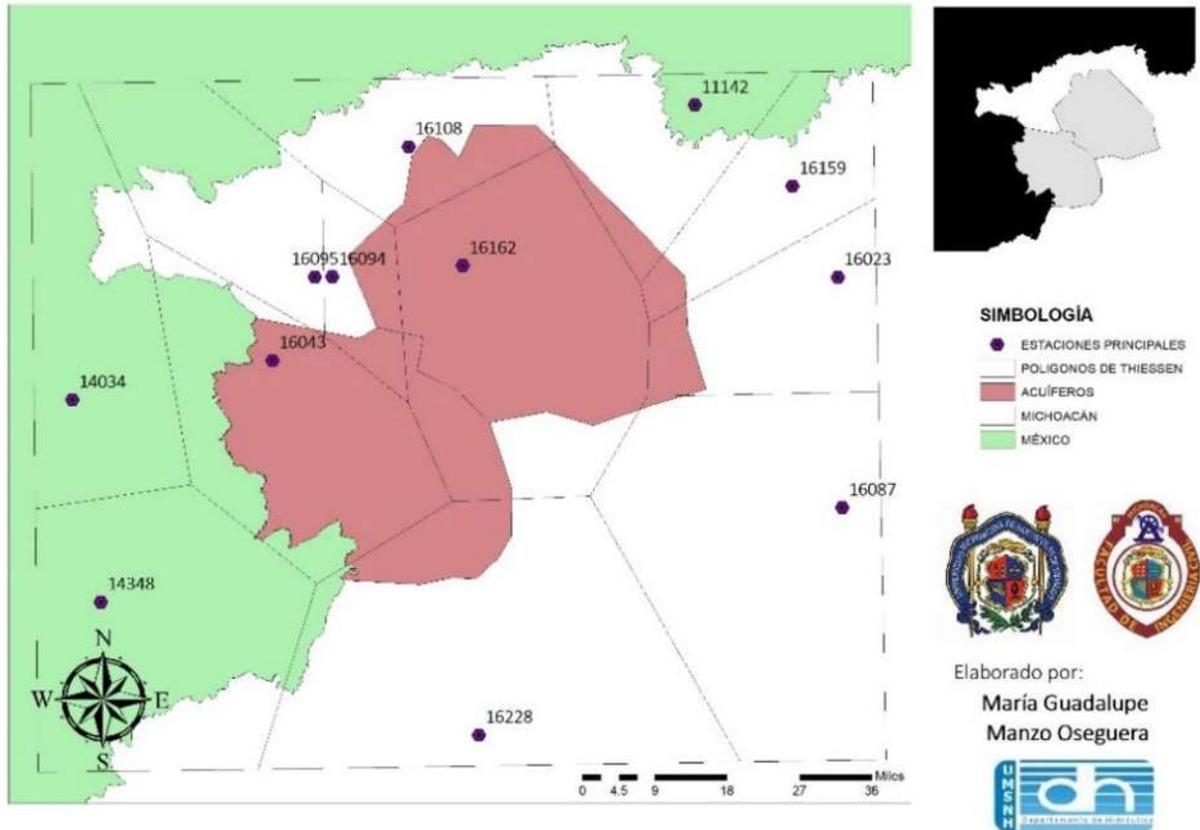


Figura 21. Polígonos de Thiessen en la zona de estudio.

7.2.2. ESTACIONES HIDROMÉTRICAS

En la zona de estudio y a su alrededor se ubicaron 33 estaciones hidrométricas aproximadamente (Figura 22) estas a partir de los archivos espaciales de CONABIO se pudieron identificar las estaciones hidrométricas al interior de la zona de estudio de las cuales se seleccionaron solo 2 (Figura 23) dado que son las únicas que se encuentran con información suficiente para poder realizar la calibración y no presentan afectación por extracción o aportación, es decir, que se encuentran en régimen natural.

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

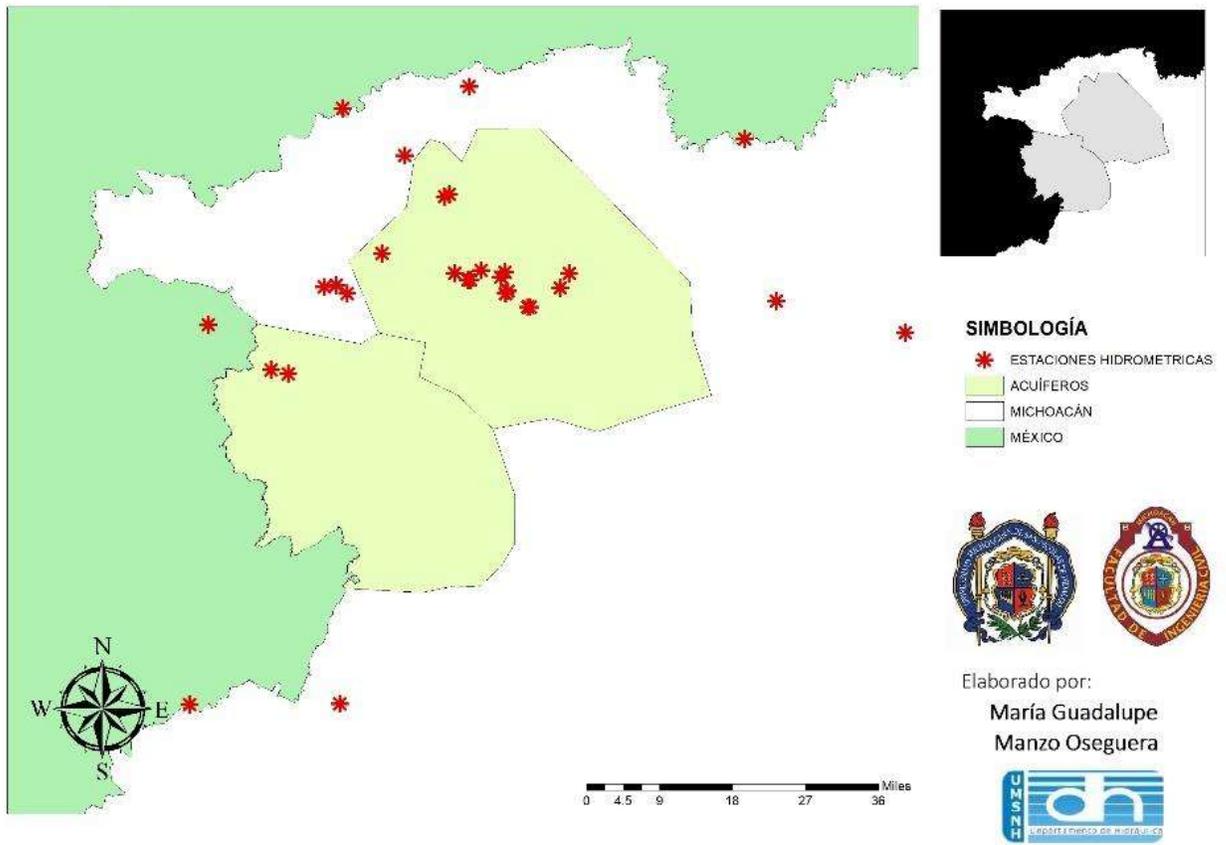


Figura 22. Estaciones hidrométricas cerca de la zona de estudio.

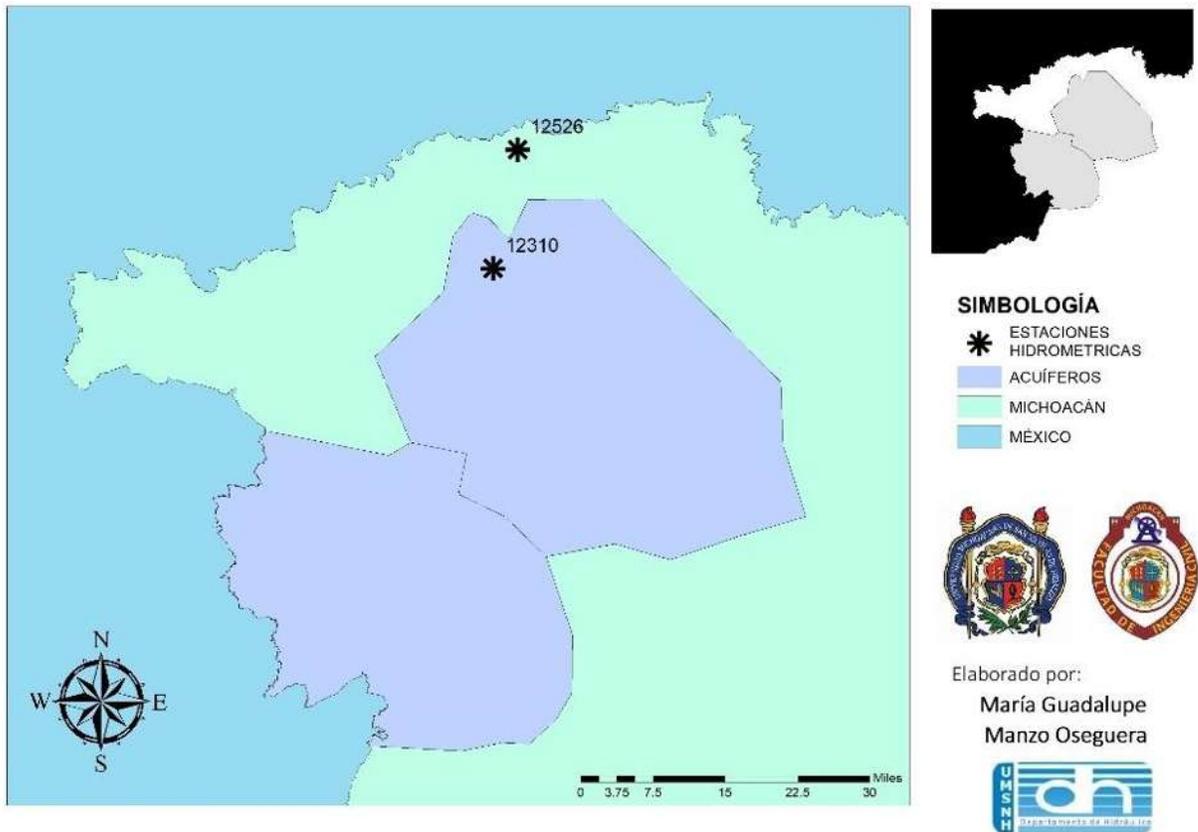


Figura 23. Estaciones hidrométricas para la calibración del modelo.

Las estaciones hidrométricas elegidas son:

- Estación hidrométrica con clave DM12310, y nombre “LA ESTANZUEL”, localizada sobre el río Duero y cuenta con un periodo de registro de 19 años, con un periodo de 1980 a 1997.
- Estación hidrométrica con clave DM12526, y nombre “YURECUARO II”, cuenta con un periodo de registro de 27 años, con un periodo de 1980 a 2007.

7.3. MODELACIÓN SUPERFICIAL

Para lograr la modelación y la calibración de nuestra zona trabajamos con el modelo Témez que se encuentra dentro de Evalhid.

Con esto se generaron dos cuencas las cuales llamamos “Cuenca 5” y “Cuenca 8”, ya que son las únicas que se podrían calibrar tomando como punto de salida las estaciones hidrométricas antes mencionadas (DM12310 para la cuenca 5 y DM12526 para la cuenca 8) (Figura 24).

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

Para elaborar los modelos que vamos a calibrar se necesitan los datos de información de precipitación, evapotranspiración y temperatura; además de alguna información morfológica (información vectorial en formato shape de las microcuencas, y sus puntos de salida) que se obtiene con el SIG y para la calibración se requiere la información de las estaciones hidrométricas a los cuales les llamamos datos observados, estos permitirán ajustar los parámetros de Témez para que el modelo se aproxime lo más posible a la realidad.

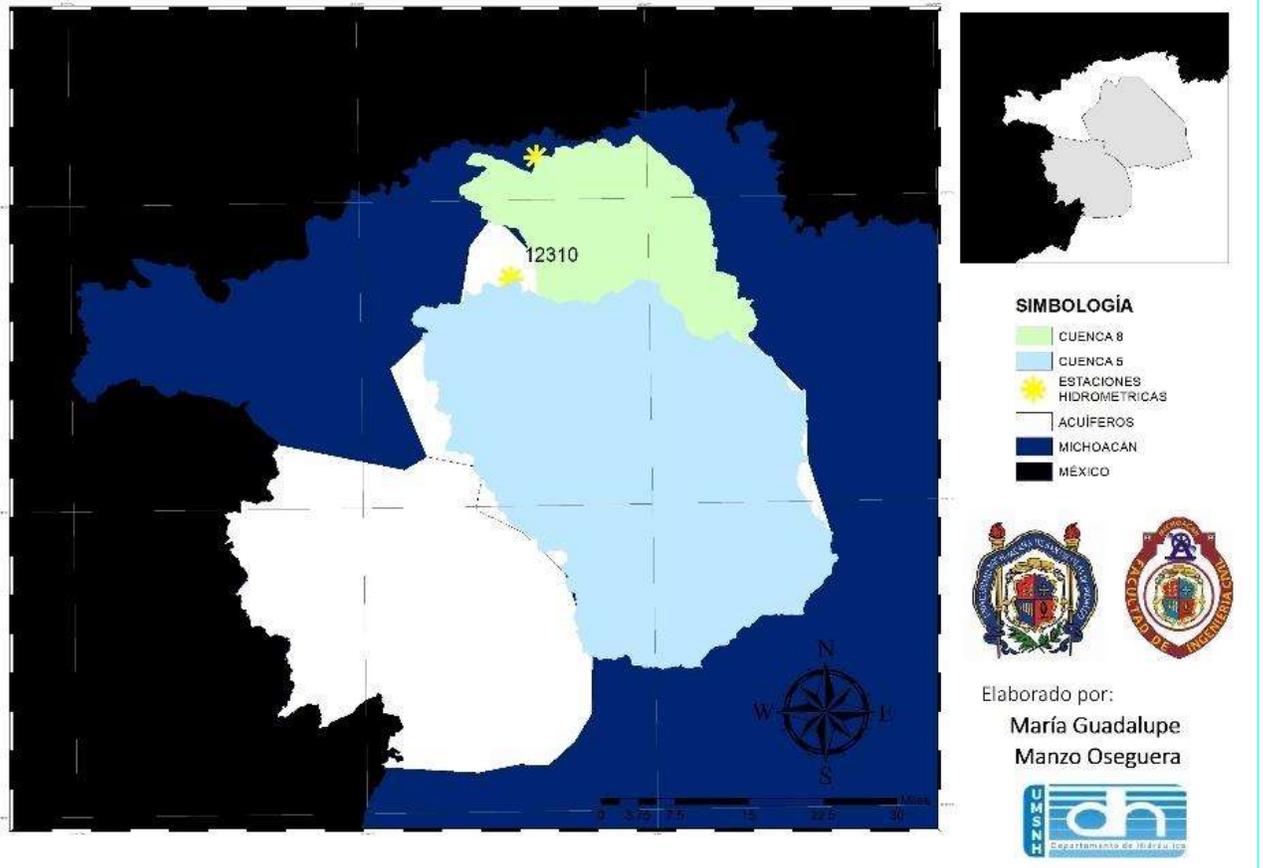


Figura 24. Cuencas de calibración y sus puntos de salida

7.3.1. CALIBRACIÓN DE LAS SUBCUENCAS

El proceso de calibración se realizó en 3 etapas, dadas las estaciones hidrométricas localizadas en la zona y una similitud hidrológica, la primera calibración fue de la cuenca 8, con el punto de desagüe en la estación hidrométrica DM12326, seguido de la cuenca 5 con su punto de desagüe en la estación hidrométrica DM12310. Los datos de entrada de ambas cuencas a Evalhid, son el archivo tipo “Shp” con las microcuencas y el punto de desagüe, además de los datos de precipitación, temperatura y observados, estas series fueron creadas con el generador de datos, el cual guarda la información en formato “.txt” con nombre:

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

“Apo_precip”, “Apo_Atp” y “Obs”, el archivo de observados será de ayuda para la calibración.

Una vez que ya se haya calibrado la primera cuenca (Cuenca 8), se volverá a realizar el mismo proceso para la cuenca 5.

El proceso vuelve a repetirse para una cuenca más denominada “Cuenca Cotija” la cual se localiza en el acuífero de Cotija, pero ya que esta no cuenca con información de una estación hidrométrica para poder calibrarla es necesario realizar una similitud hidrológica, revisando la similitud entre cuencas y colocando parámetros ya calibrados.

7.3.2. CALIBRACIÓN CUENCA 8

La cuenca 8, será la primera en calibrar tiene un área de 861.348422km² y se subdivide en microcuencas, dando como resultado un total de 74 microcuencas (Figura 25), cuya información es la siguiente:

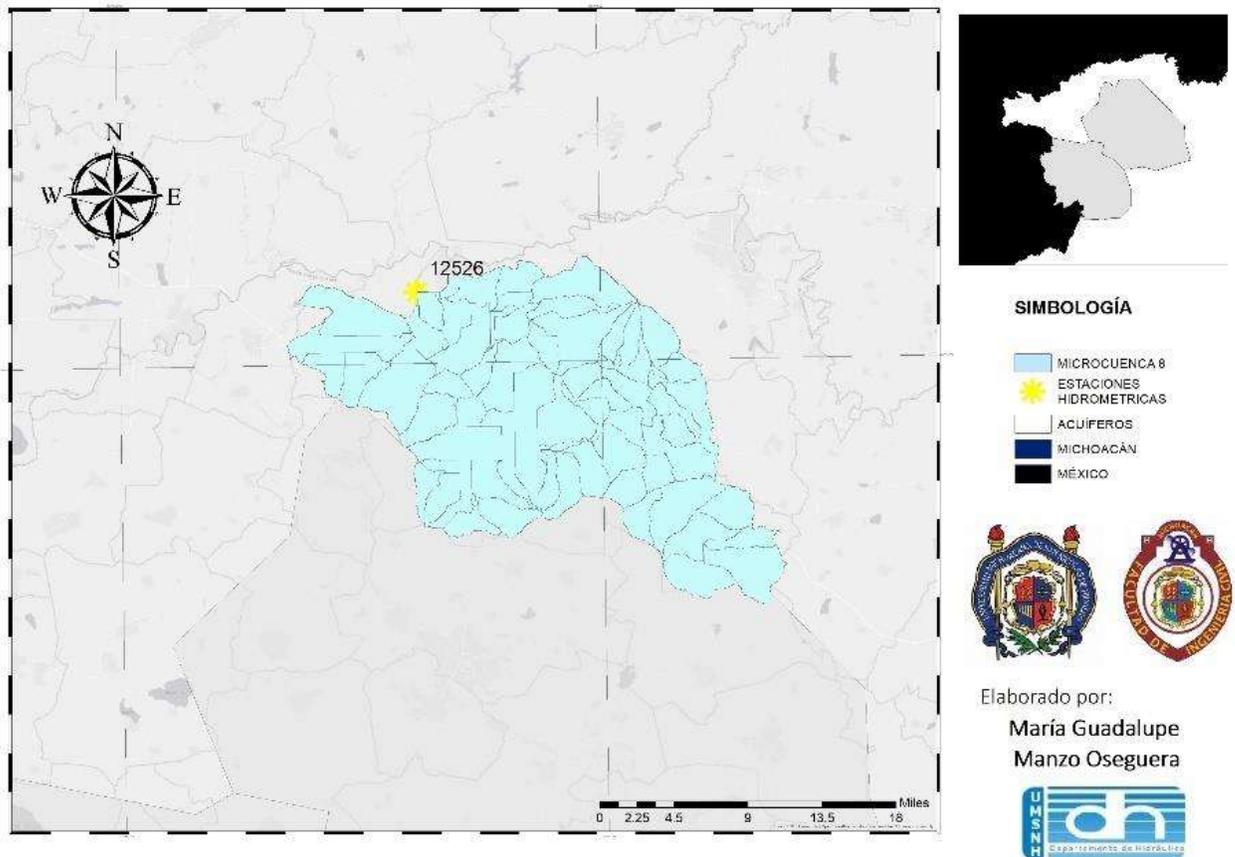


Figura 25. División de microcuencas en la cuenca 8.

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

A partir del MDE de la región se generó el sistema de drenaje de la cuenca y de este sistema se muestran también las microcuencas (Figura 25) y las estaciones climatológicas que serán ocupadas para las series de datos necesarios dentro de la cuenca 8 como se muestra en la (Figura 26).

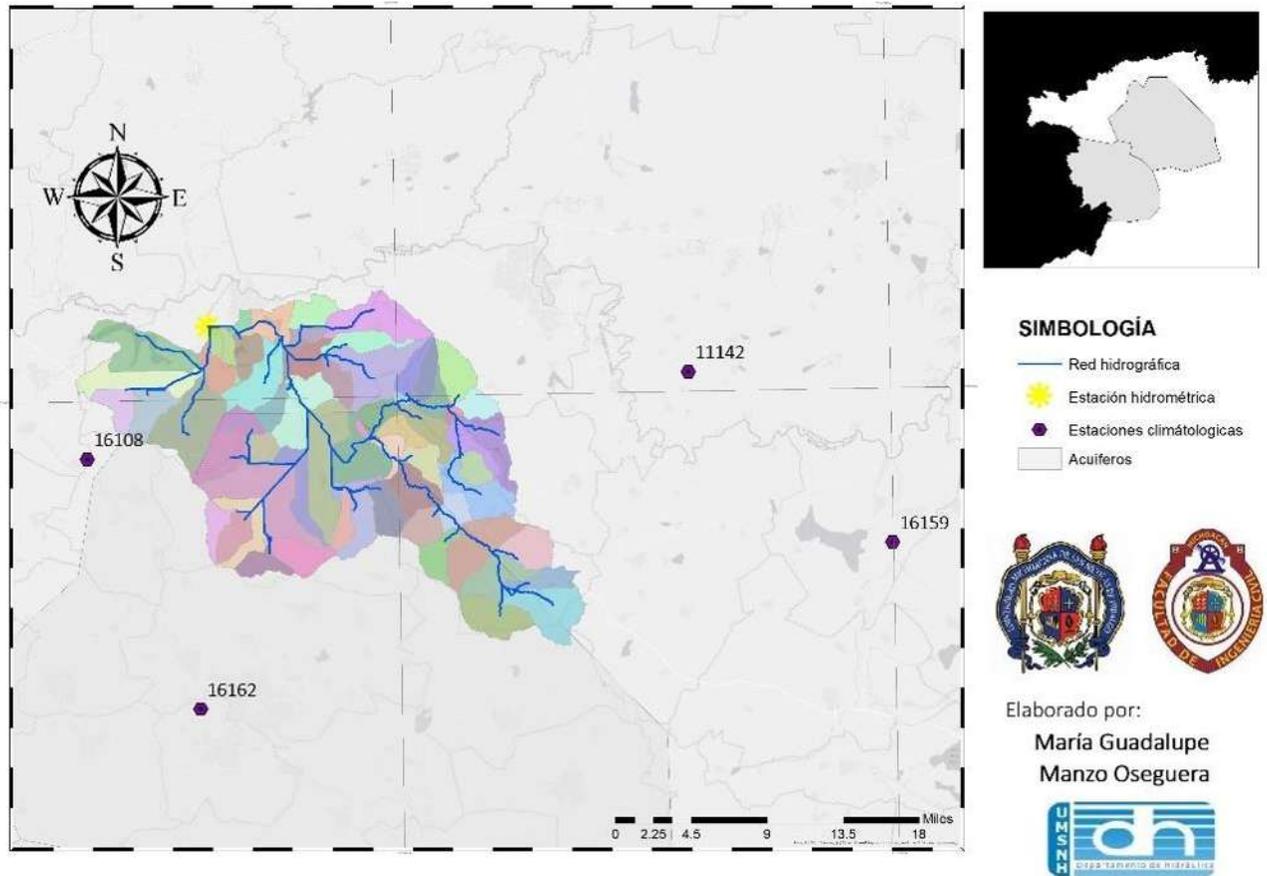


Figura 26. Red hidrográfica y estaciones meteorológicas de la cuenca 8.

Las estaciones meteorológicas se eligieron de acuerdo a los polígonos de Thiessen mostrados anteriormente en la (Figura 21), y para la cuenca 8, son las siguientes:

Tabla 10. Estaciones meteorológicas necesarias para calibrar la cuenca 8.

N° ESTACION	CODIGO	NOMBRE	FECHA INICIAL	FECHA FINAL	AÑOS EFECTIVOS
1	16108	SAN CRISTOBAL, MICH	1/1/1980	1/7/2007	27 años
2	11142	EL CUBO, GTO	1/1/1980	1/7/2007	27 años
3	16162	ORANDINO, MICH	1/1/1980	1/7/2007	27 años
4	16159	EL ROSARIO, MICH	1/1/1980	1/7/2007	27 años

Tabla 11. Estación hidrométrica necesaria para calibrar la cuenca 8.

N° ESTACION	CODIGO	NOMBRE	FECHA INICIAL	FECHA FINAL	AÑOS EFECTIVOS
1	DM12526	YURECUARO II	1/1/1980	1/7/2007	27 años

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

En el modelo de la cuenca 8 se colocó como punto de desagüe superficial la ubicación de la estación hidrométrica DM12526 (punto de salida y microcuencas, Figura 25) para así poder obtener la escorrentía de todas las microcuencas en ese punto.

Al conocer la influencia que tiene cada estación meteorológica sobre las microcuencas y poder llevar a cabo el traslado de información, se generan estaciones ficticias para los casos en los que se presenta más de una zona de influencia, mientras que los conjuntos de microcuencas bajo una misma afectación se unen en un solo sistema y dentro de cada estación ficticia de debe de tener la información de precipitación, llegando a la configuración de la (Figura 27).

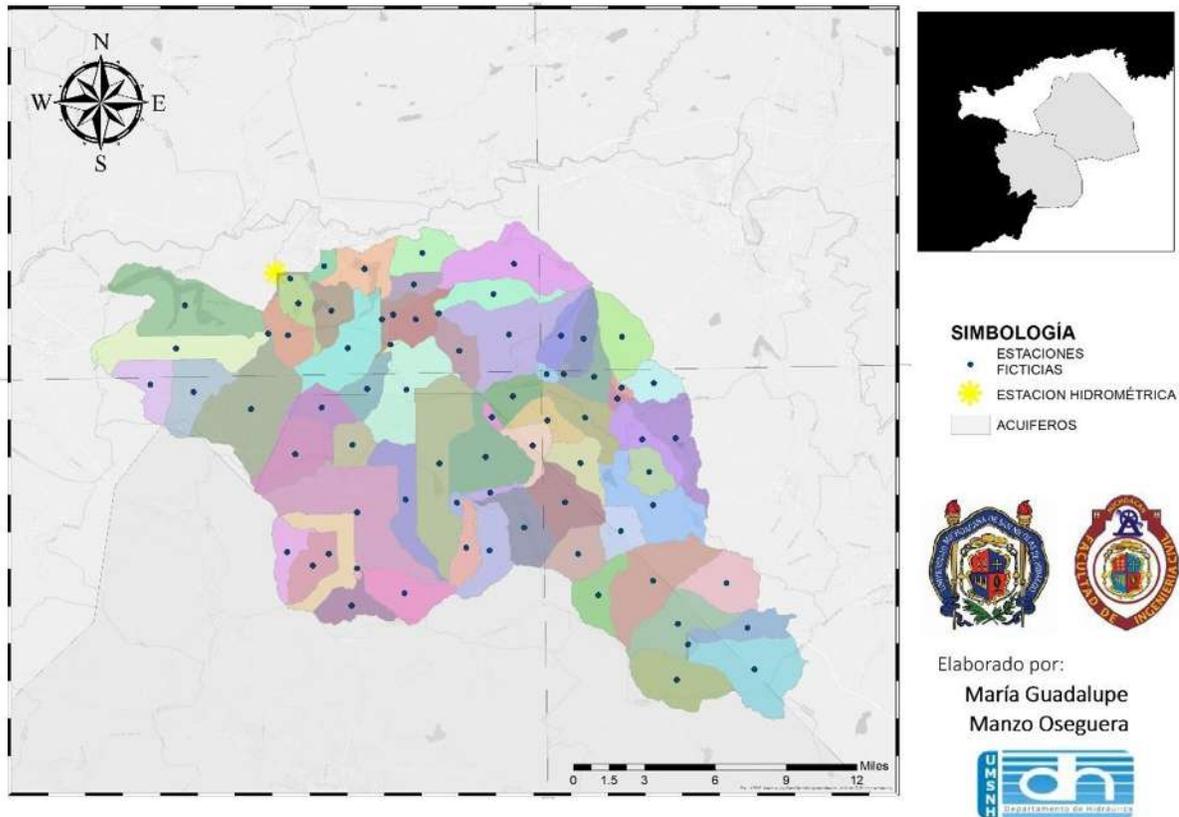


Figura 27. Estaciones ficticias para la cuenca 8

El periodo de simulación para la calibración del modelo fue de 1980 a 2007, dando como resultado los siguientes indicadores de ajuste, los cuales muestran un rango excelente de calibración, siendo esto un indicador de que el modelo es bueno.

Tabla 12. Valores de las funciones objetivo del algoritmo calibrador SCE-UA para la cuenca 8.

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

Funcion Objetivo	Validacion	Calibracion
Valor FO:	3.4327	3.2471
Nash:	0.773	0.8224
Logaritmo de Nash	0.7651	0.517
Coefficiente de Pearson	0.9229	0.9114
Simetria	0.9715	0.9962

Los resultados de la calibración del modelo para la cuenca 8 se pueden apreciar de manera visual en las siguientes gráficas:

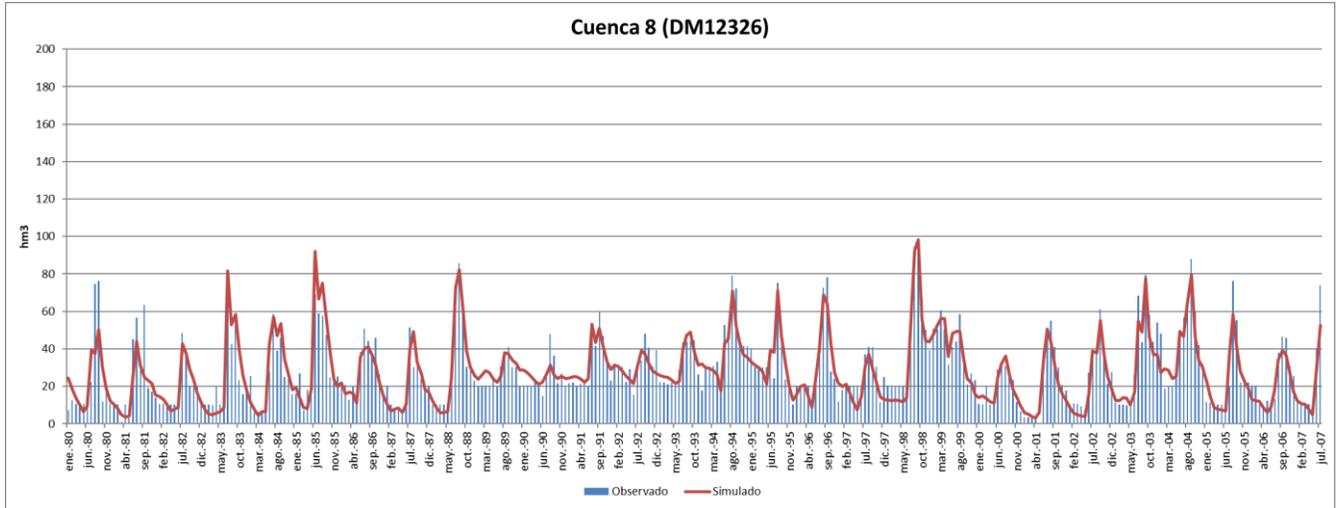


Figura 28. Escurrecimientos mensuales resultantes (hm³) de la cuenca 8.

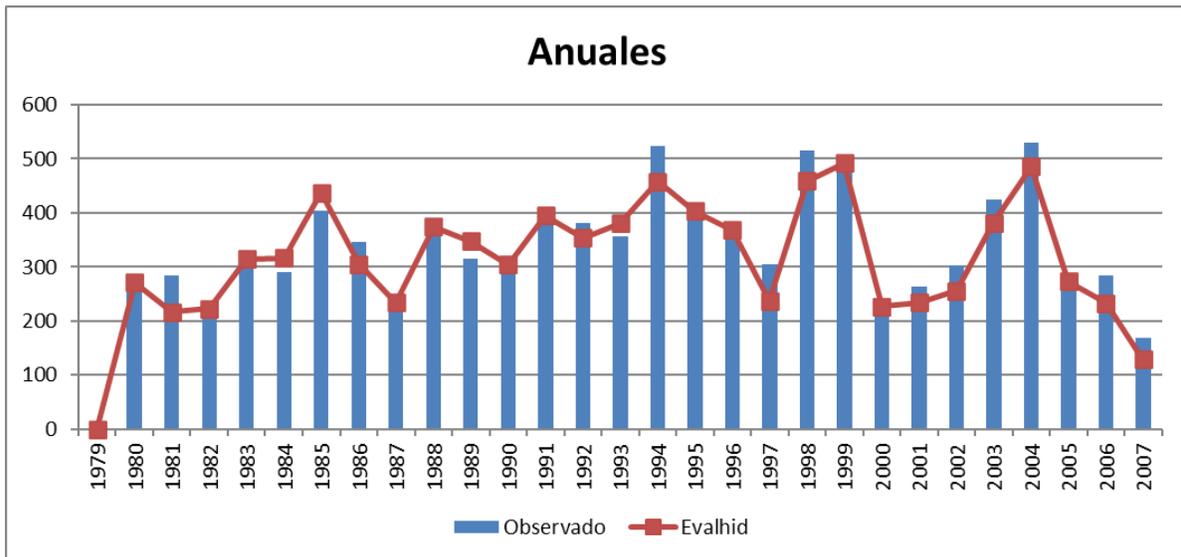


Figura 29. Escurrecimientos anuales resultantes (hm³) de la cuenca 8.

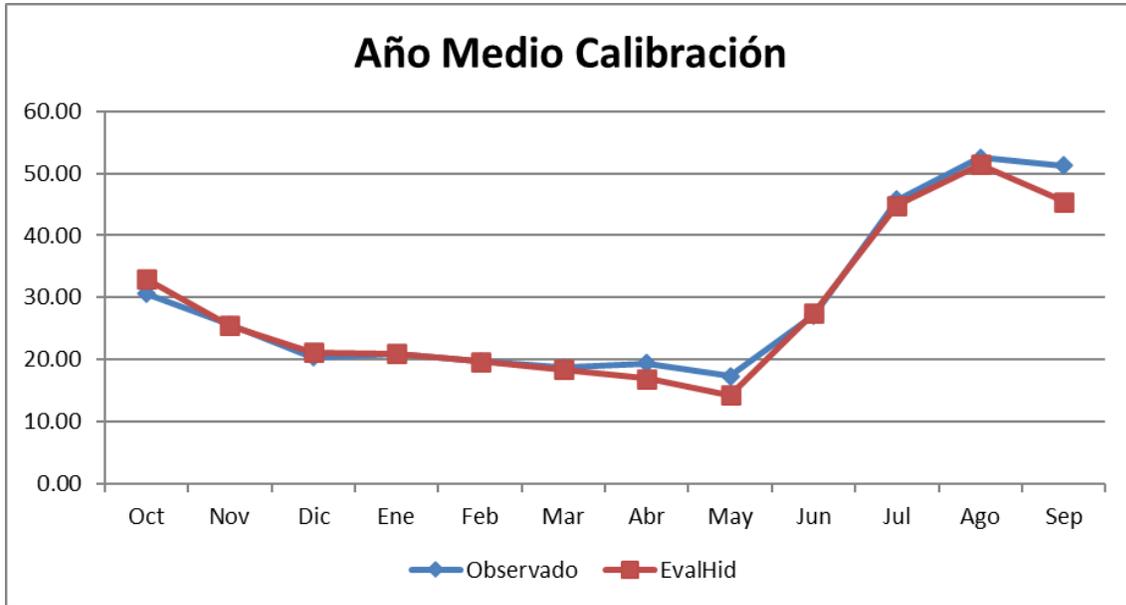


Figura 30. Escurrecimientos de año medio resultantes (hm³) de la cuenca 8.

7.3.3. CALIBRACIÓN CUENCA 5

La cuenca 5, es la segunda cuenca a calibrar tiene un área de 2823.7 Km² y se subdivide en 63 microcuencas (Figura 27), esta cuenca cubre gran parte del acuífero de Zamora y su información es la siguiente:

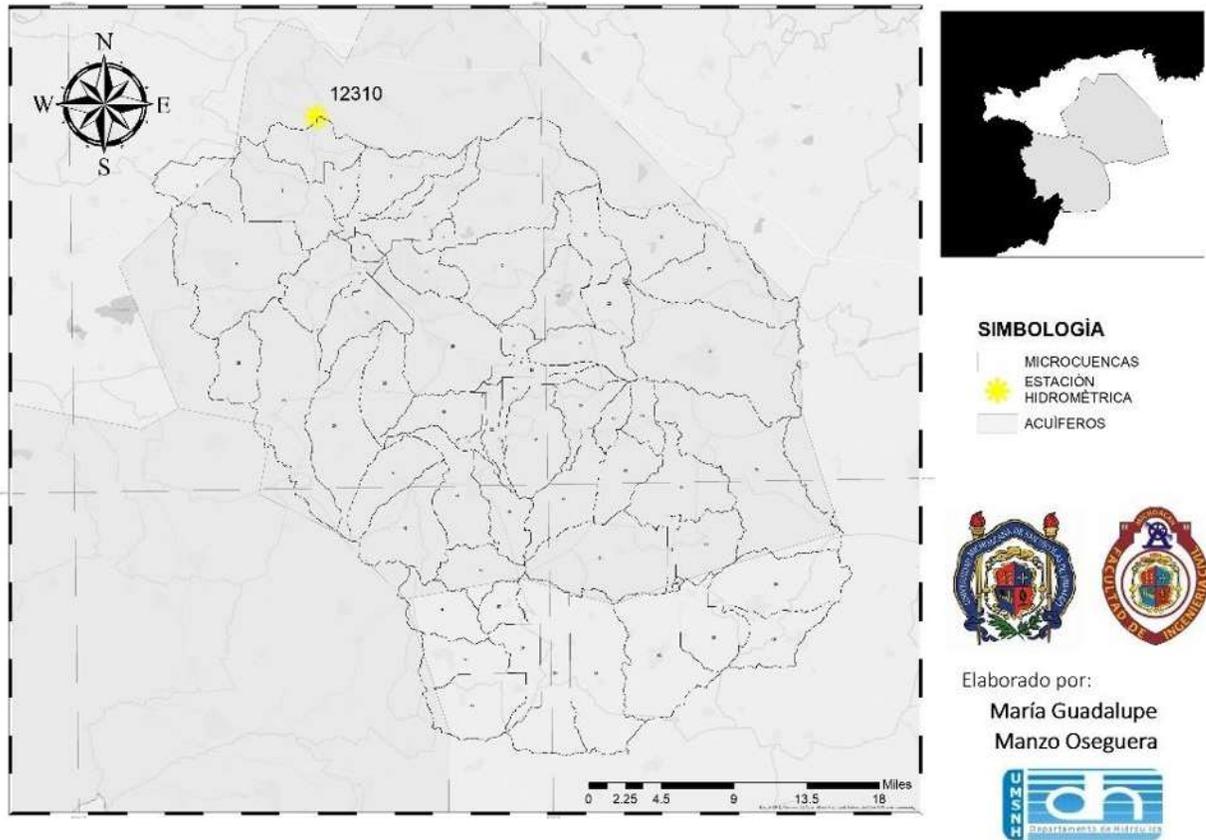


Figura 31. División de microcuencas en la cuenca 5.

De igual manera que la cuenca 8, a partir del MDE de la región se generó el sistema de drenaje de la cuenca y también se muestran las microcuencas y las estaciones meteorológicas que serán ocupadas para las series de datos necesarios dentro de cuenca 5 como se muestra en la (Figura 31).

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

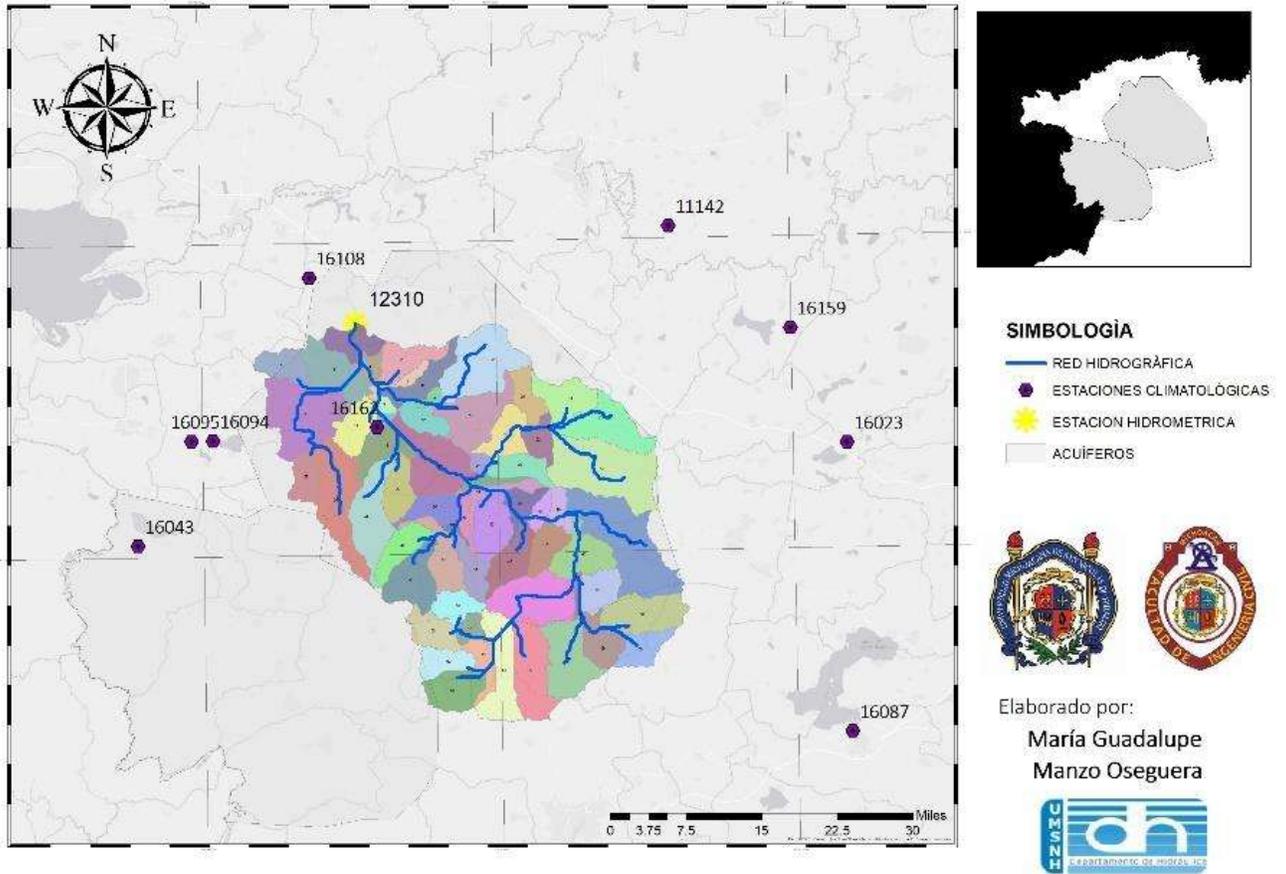


Figura 32. Red hidrográfica y estaciones meteorológicas de la cuenca 5.

Las estaciones meteorológicas se eligieron de acuerdo a los polígonos de Thiessen mostrados anteriormente en la (Figura 21), y para la cuenca 5, son las siguientes:

Tabla 13. Estaciones meteorológicas para calibrar la cuenca 5.

N° ESTACION	CODIGO	NOMBRE	FECHA INICIAL	FECHA FINAL	AÑOS EFECTIVOS
1	16043	EL PUERTO, MICH	1/1/1980	01/02/1999	19
2	16094	PRESA GUARACHA, MICH	1/1/1980	01/02/1999	19
3	16095	PRESA JARIPO, MICH	1/1/1980	01/02/1999	19
4	16162	ORANDINO, MICH	1/1/1980	01/02/1999	19
5	16108	SAN CRISTOBAL, MICH	1/1/1980	01/02/1999	19
6	11142	EL CUBO, GTO	1/1/1980	01/02/1999	19
7	16159	EL ROSARIO, MICH	1/1/1980	01/02/1999	19
8	16023	COPANDARO DE GALEANA, MICH	1/1/1980	01/02/1999	19
9	16087	PATZCUARO, MICH	1/1/1980	01/02/1999	19

Tabla 14. Estación hidrométrica necesaria para calibrar la cuenca 5.

N° ESTACION	CODIGO	NOMBRE	FECHA INICIAL	FECHA FINAL	AÑOS EFECTIVOS
1	DM12310	“LA ESTANZUEL”,	1/1/1980	01/02/1999	19

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

En el modelo de la cuenca 5 se colocó como punto de desagüe superficial la ubicación de la estación hidrométrica DM12310 punto de salida y cuencas, (Figura 31) para así poder obtener la escorrentía de todas las microcuencas en ese punto.

Y de la misma manera que la cuenca 8, para llevar a cabo el traslado de la información, se generaron las estaciones ficticias en las microcuencas (Figura 33).

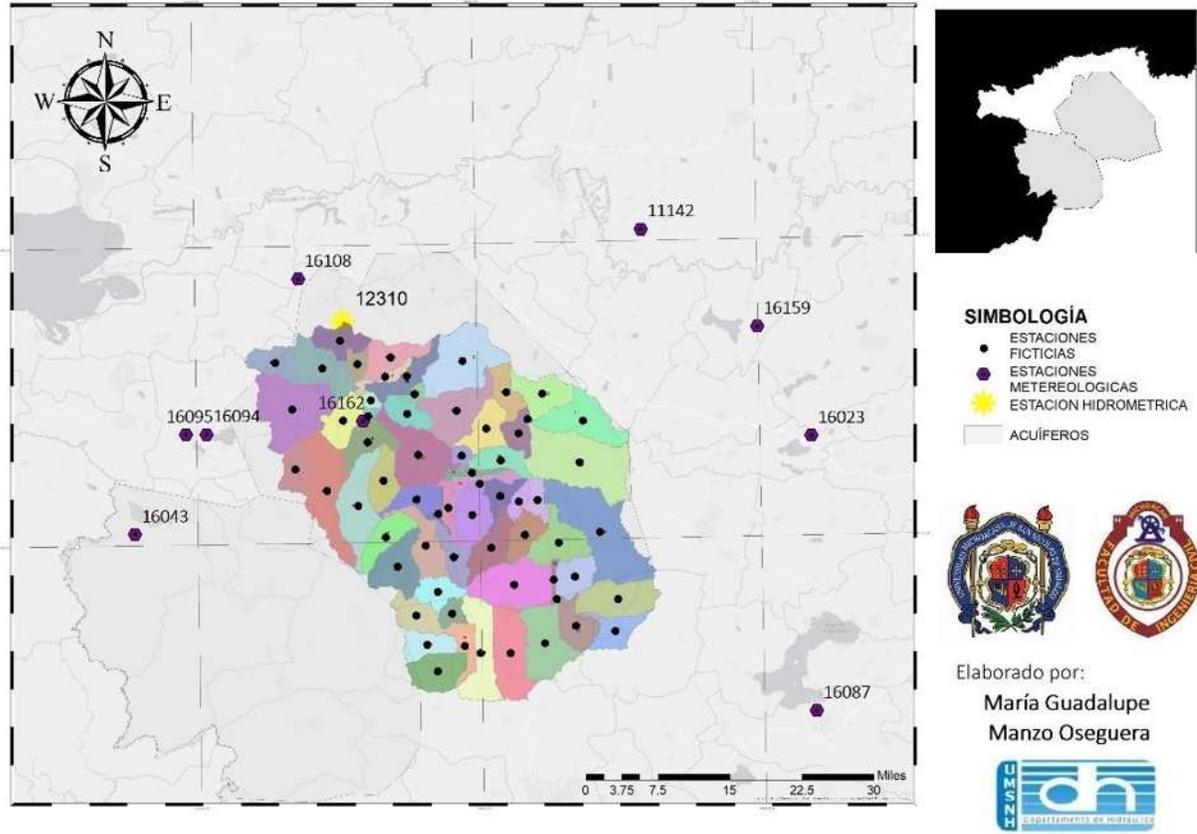


Figura 33. Estaciones ficticias de la cuenca 5.

El periodo de simulación para la calibración del modelo fue de 1980 a 1999, dando como resultado los siguientes indicadores de ajuste, los cuales muestran un rango bueno de calibración, siendo esto un indicador de que el modelo es bueno.

Tabla 15. Valores de las funciones objetivo del algoritmo auto calibrador SCE-UA para la cuenca 5.

Funcion Objetivo	Validacion	Calibracion
Valor FO:	2.7265	3.3869
Nash:	0.5587	0.7615
Logaritmo de Nash	0.4186	0.7429
Coefficiente de Pearson	0.7624	0.8832
Simetría	0.9866	0.9992

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

Los resultados de la calibración del modelo para la cuenca 5 se pueden apreciar en la Figura 34.

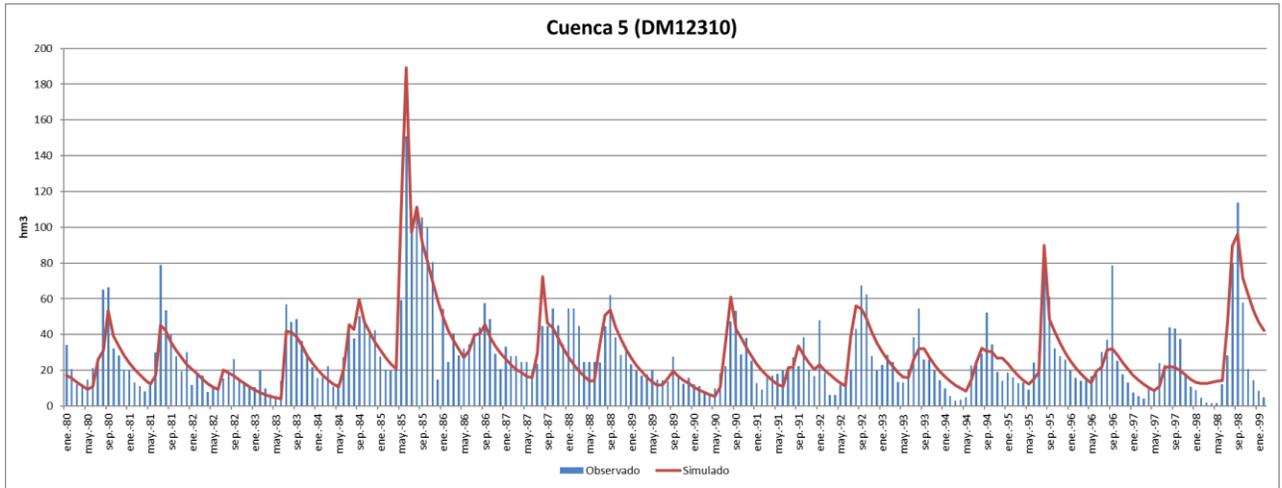


Figura 34. Escurrimientos mensuales resultantes (hm³) de la cuenca 5.

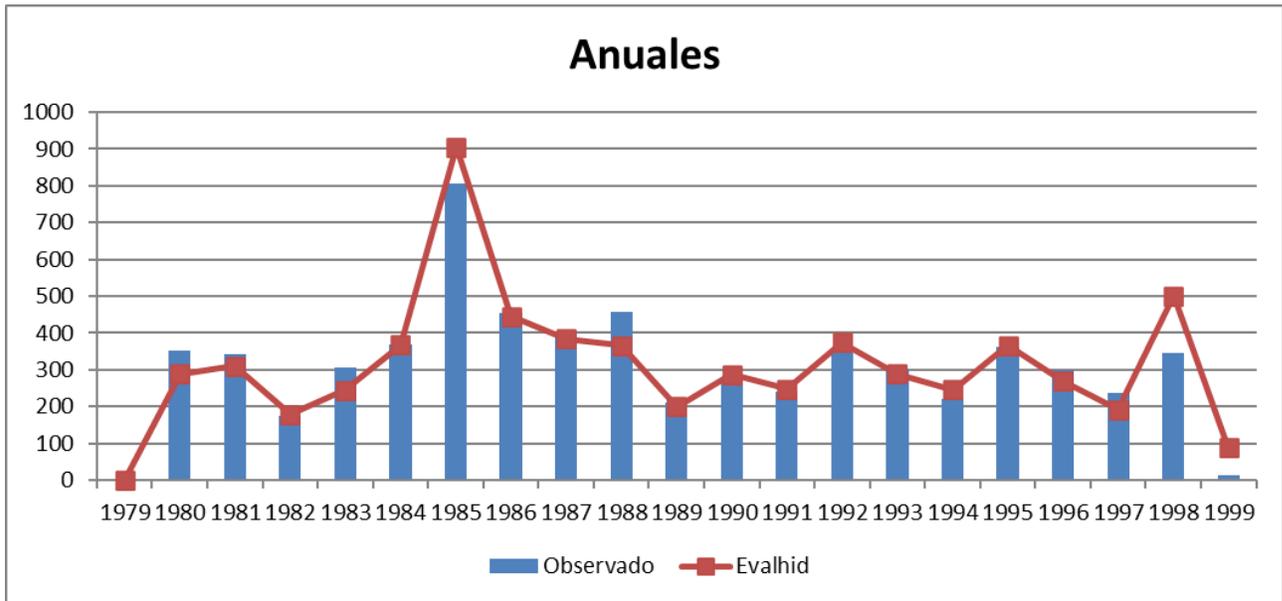


Figura 35. Escurrimientos anuales resultantes (hm³) de la cuenca 5.

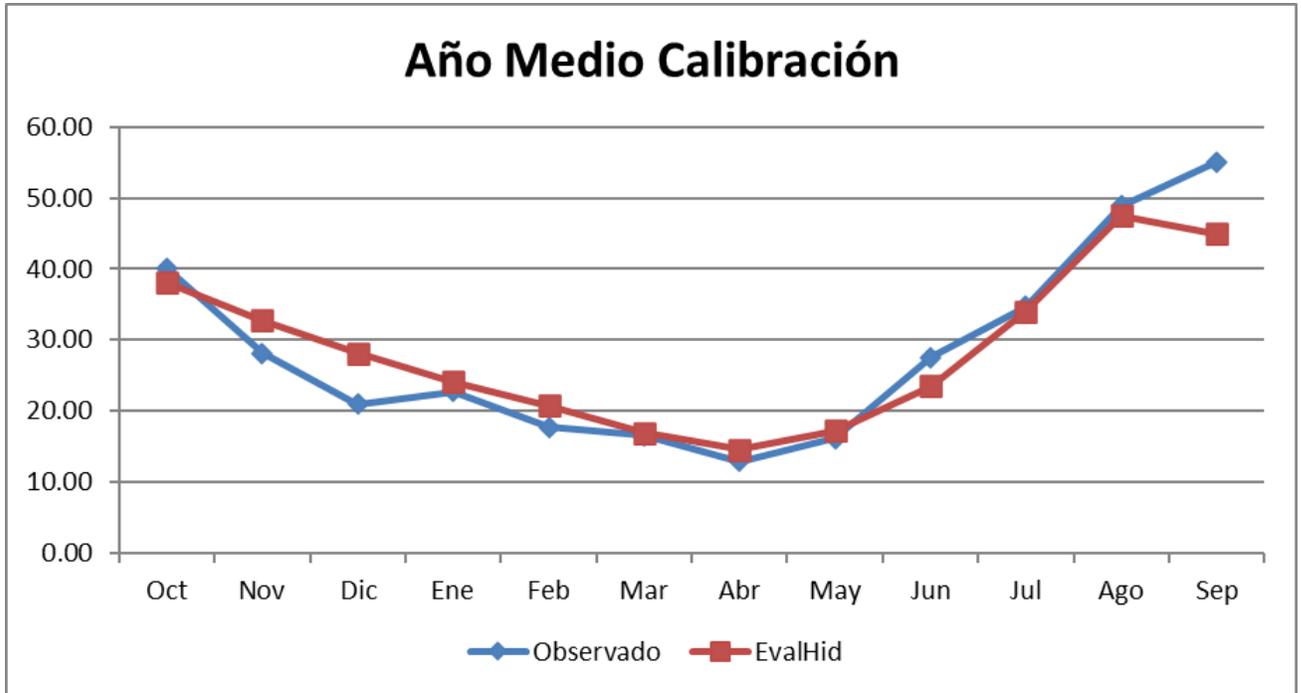


Figura 36. Escurrimientos de año medio resultantes (hm³) de la cuenca 5.

7.3.4. SIMILITUD HIDROLÓGICA “CUENCA COTIJA”

Para esta similitud hidrológica, ya tenemos las cuencas anteriores calibradas, (Cuenca 5 y 8) por lo que ya tenemos el acceso a la información de su Humedad (Hmax), Coeficiente de escurrimiento (C), Infiltración (Imax) y Alfa.

En este caso como no tenemos una estación hidrométrica con la cual podamos comparar respecto a datos observados, por este motivo no podemos realizar una calibración para la cuenca, entonces, se procede a hacer una similitud hidrológica, esta consiste realizar una comparación y para poder comparar las zonas y verificar que efectivamente se parecen hidrológicamente se comparan variables como usos de suelo, tipo de suelo, precipitaciones, temperaturas, climas etc. parámetros que relacionen que las zonas en las cuales se hará la similitud se parecen entre sí, en el estudio tomaremos la cuenca 5 (que es la cuenca ya calibrada), con la cuenca que no podemos realizar la calibración por falta de información, en el caso es la “Cuenca Cotija”, posterior a eso se tomaran los parámetros ya calibrados de la cuenca 5 y se le asignaran a la cuenca Cotija, para después poder generar las series de caudales.

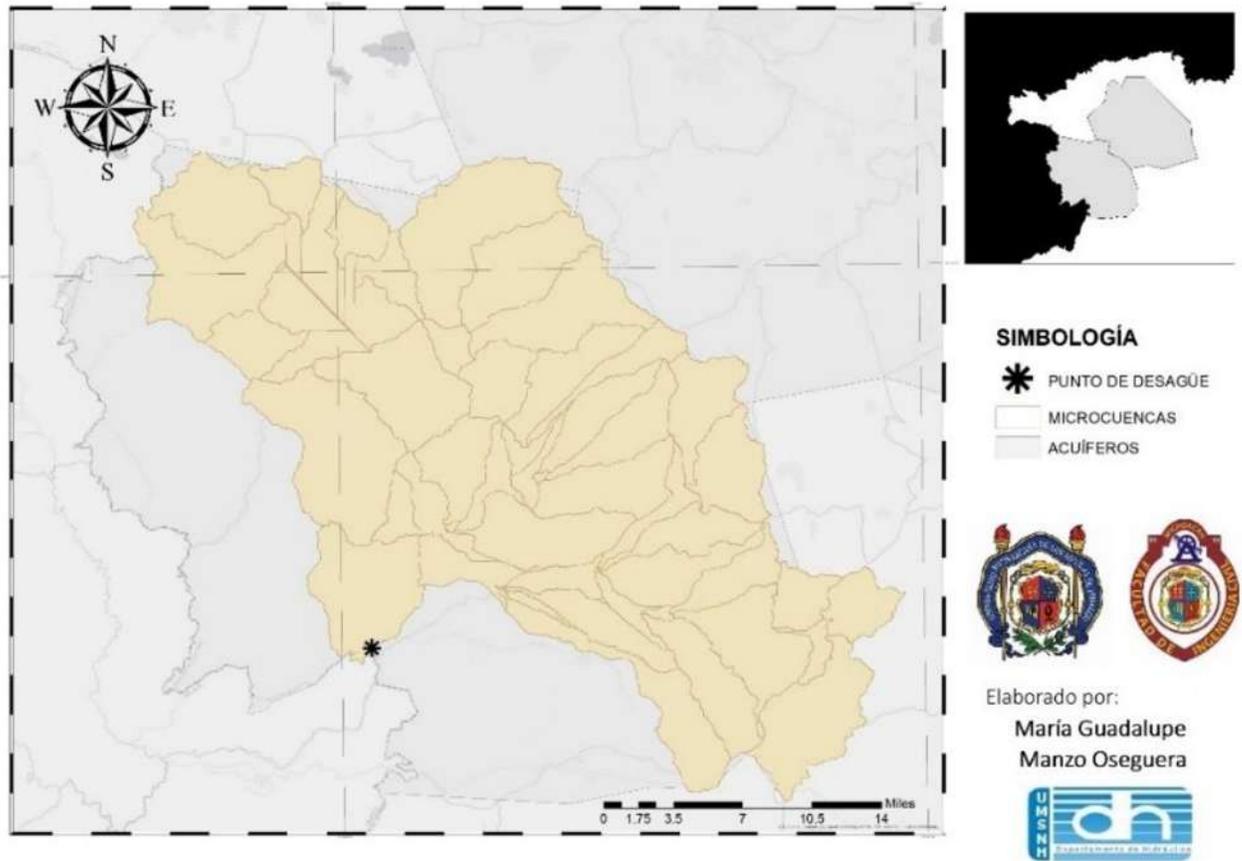


Figura 37. Microcuencas de la cuenca Cotija.

La cuenca Cotija cuenca con un área de 1615.2 Km² y abarca un gran parte del acuífero de Cotija, se dividió en 55 microcuencas, y el punto de desagüe se generó de manera que la cuenca nos abarcara la mayor parte posible del acuífero.

Para esta etapa fue necesario realizar la similitud hidrológica antes mencionada, colocando los parámetros calibrados de la cuenca 5 a estas 55 microcuencas encontradas en el acuífero de Cotija, puesto que esta restituida a régimen natural.

Se realiza la comparación del uso y tipo de suelo como se muestra a continuación.

En El uso de suelo vemos que lo que más predomina es el bosque y el área agrícola.

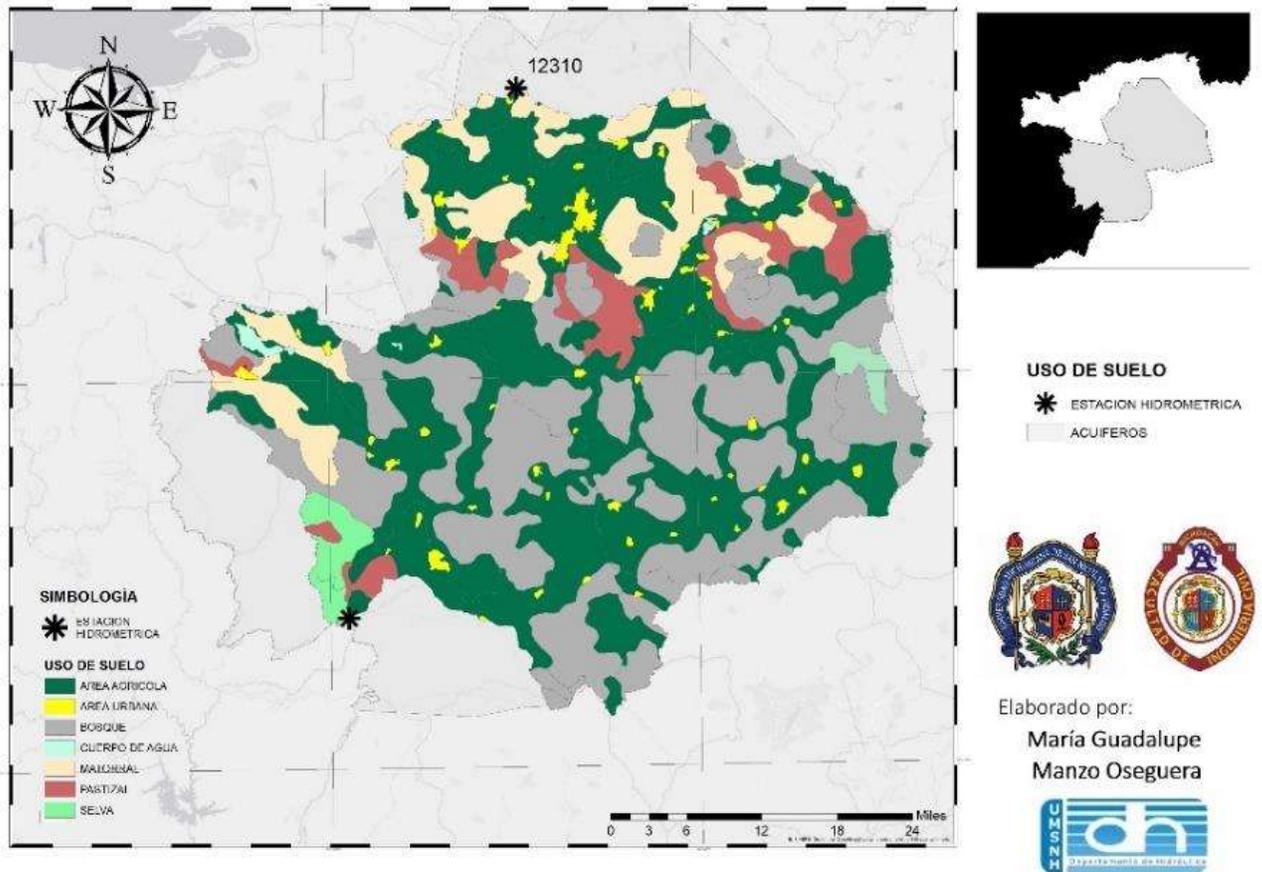


Figura 38. Uso de suelo en cuencas de comparación.

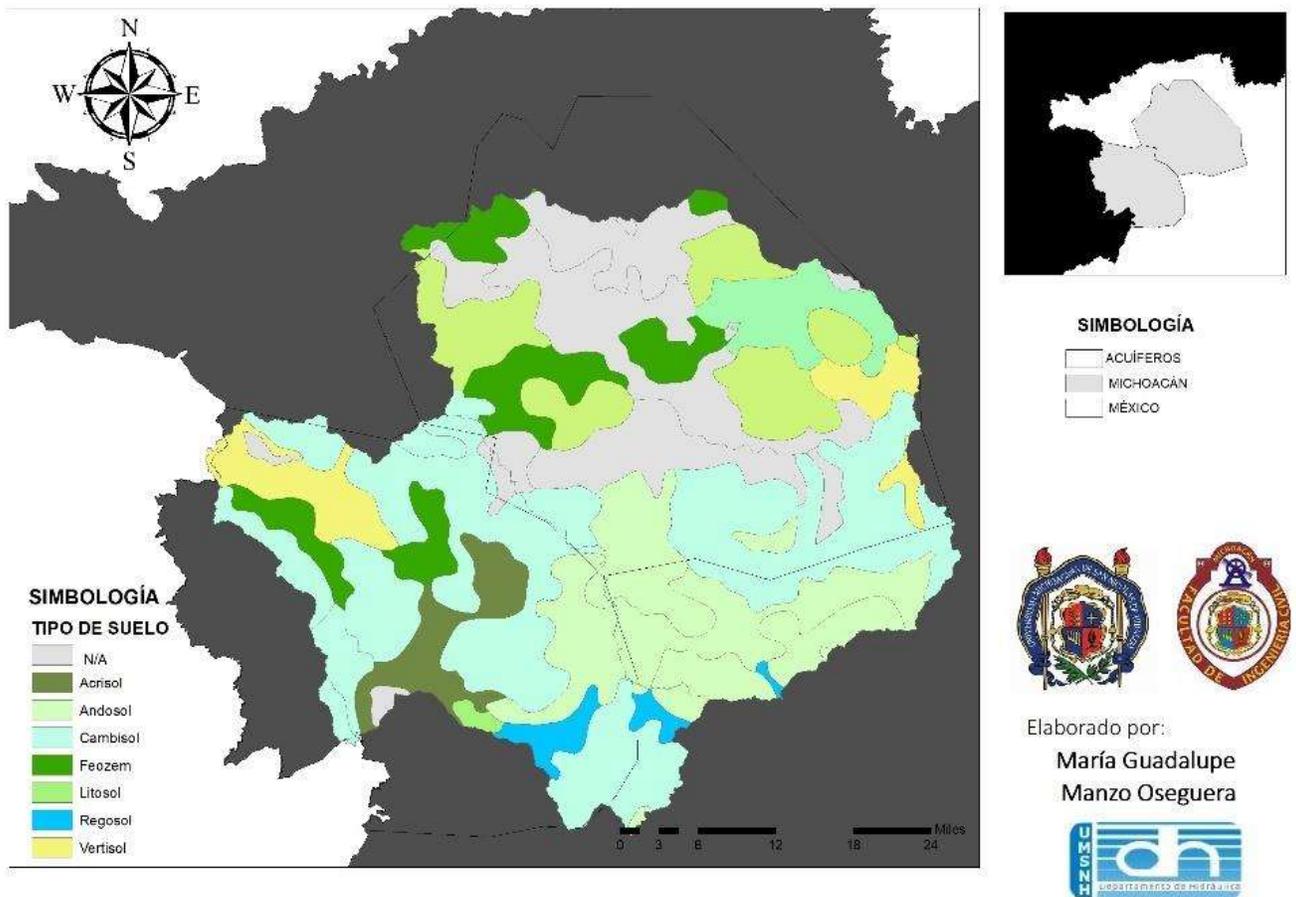


Figura 39. Tipo de suelo en cuencas de comparación.

El tipo de suelo más predominante en ambas cuencas es el suelo medio, con andosol y cambisol.

Luego de comparar las cuencas vamos a asignar los parámetros para después poder generar las series de resultados.

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

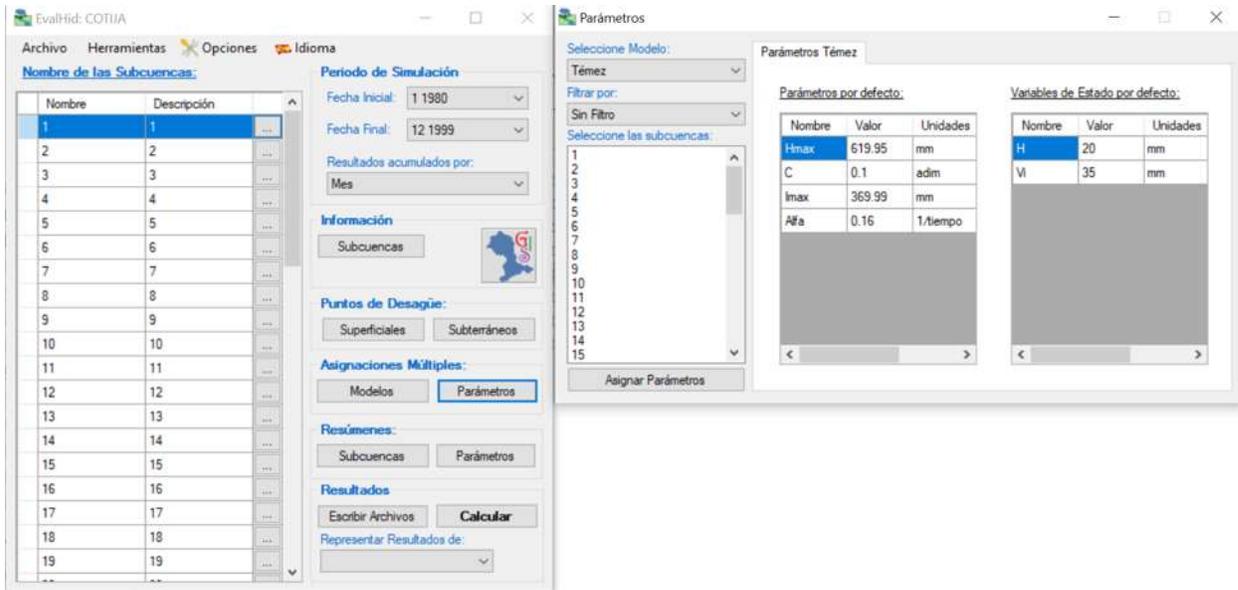


Figura 40. Ventana de Evalhid con el resumen de parámetros.

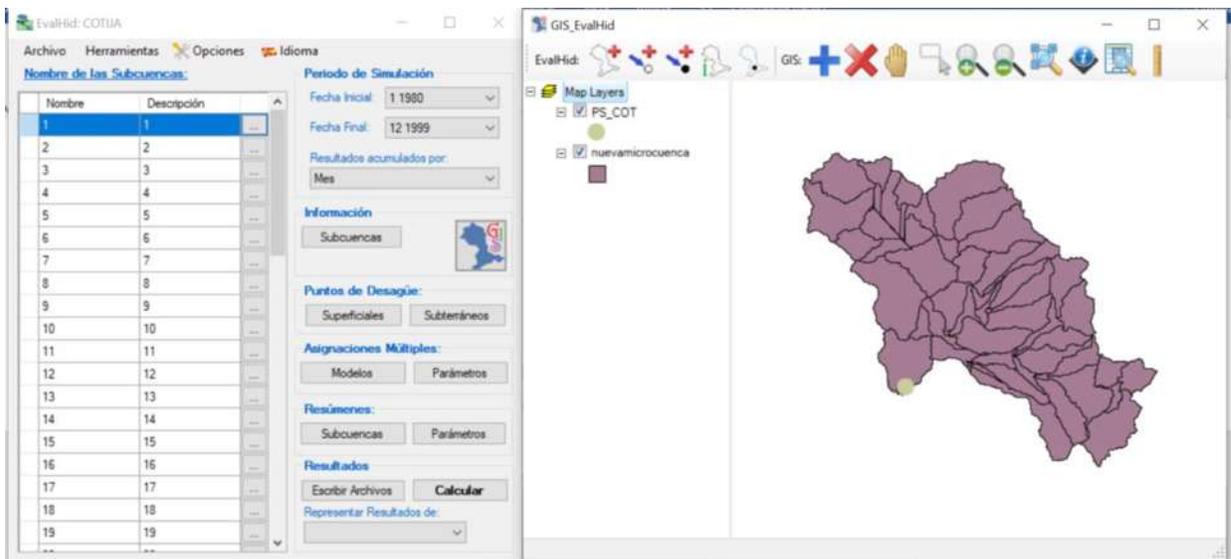


Figura 41. Ventana de Evalhid con las microcuencas y el punto de desagüe de la cuenca Cotija.

De esta manera, se obtienen los datos mensuales en Hm^3 de las aportaciones en cada uno de los puntos de salida en los diferentes periodos de registros.

A continuación, se presenta los parámetros correspondientes de humedad máxima, Infiltración máxima, el coeficiente de excedente C y el parámetro α de las cuencas.

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

Tabla 16. Parámetros de calibración del modelo hidrológico.

PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN				
DESCRIPCIÓN	Hmax	C	I _{max}	α
CUENCA 5	620	0.1	370	0.16
CUENCA 8	105	0.2	347	0.43
CUENCA COTIJA	620	0.1	370	0.16

Ante los resultados es posible admitir bajo ciertas consideraciones que el modelo reproduce de manera apropiada los escurrimientos que se presentan naturalmente, permitiendo obtener los volúmenes de infiltración o recarga hacia los acuíferos como parte de los resultados acumulados del modelo, los cuales son necesarios como parámetros de entrada para lo subterráneo.

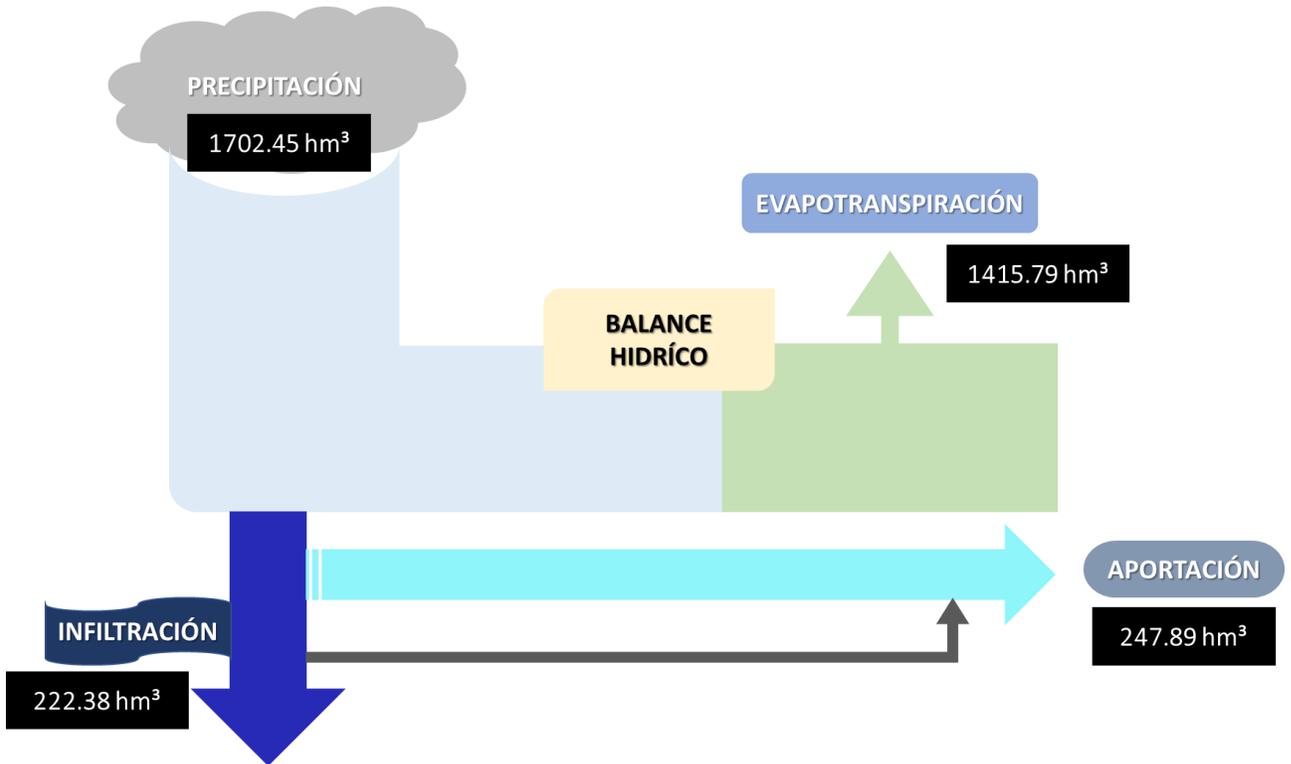


Figura 42. Balance hídrico acuífero 1622 - Cotija

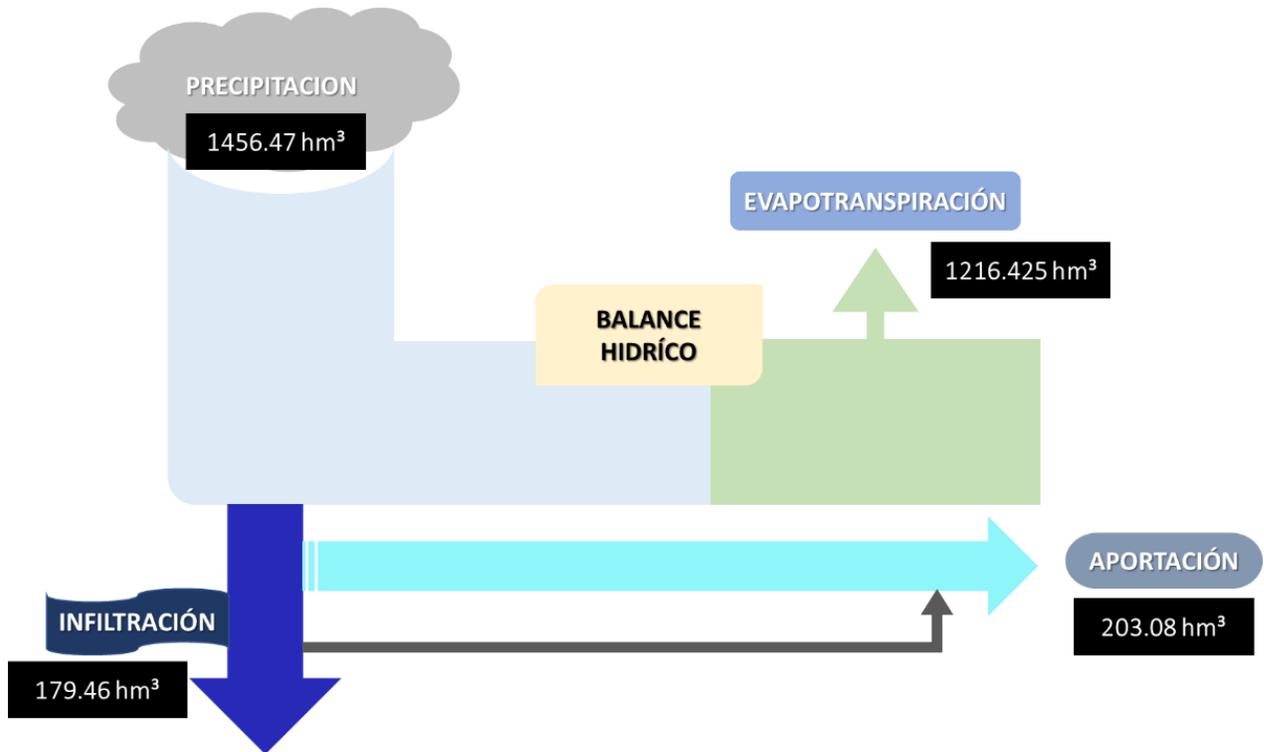


Figura 43. Balance hídrico del acuífero 1608 – Zamora

7.4. CARACTERIZACIÓN CON MODFLOW

Para realizar esta etapa de la caracterización de los acuíferos con el software modflow es necesario tener información sobre la zona de estudio, como son volúmenes de recarga y extracción, también las características geomorfológicas como es la conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento, además de elevaciones en el terreno, y localización de manantiales conectados al acuífero, otra característica importante para la realización de la modelación superficial es la altura del nivel estático inicial.

7.4.1. MANANTIALES

Los manantiales provienen de los acuíferos cuando el agua de lluvia que logra infiltrarse regresa a la superficie del terreno en algún punto de la topografía, y esto es porque el nivel topográfico choca con el nivel estático del acuífero.

Como se observa en la Figura 44, dentro del área de los acuíferos en estudio se encuentran, según INEGI, 92 manantiales gran parte de ellos están ubicados en el acuífero de Zamora.

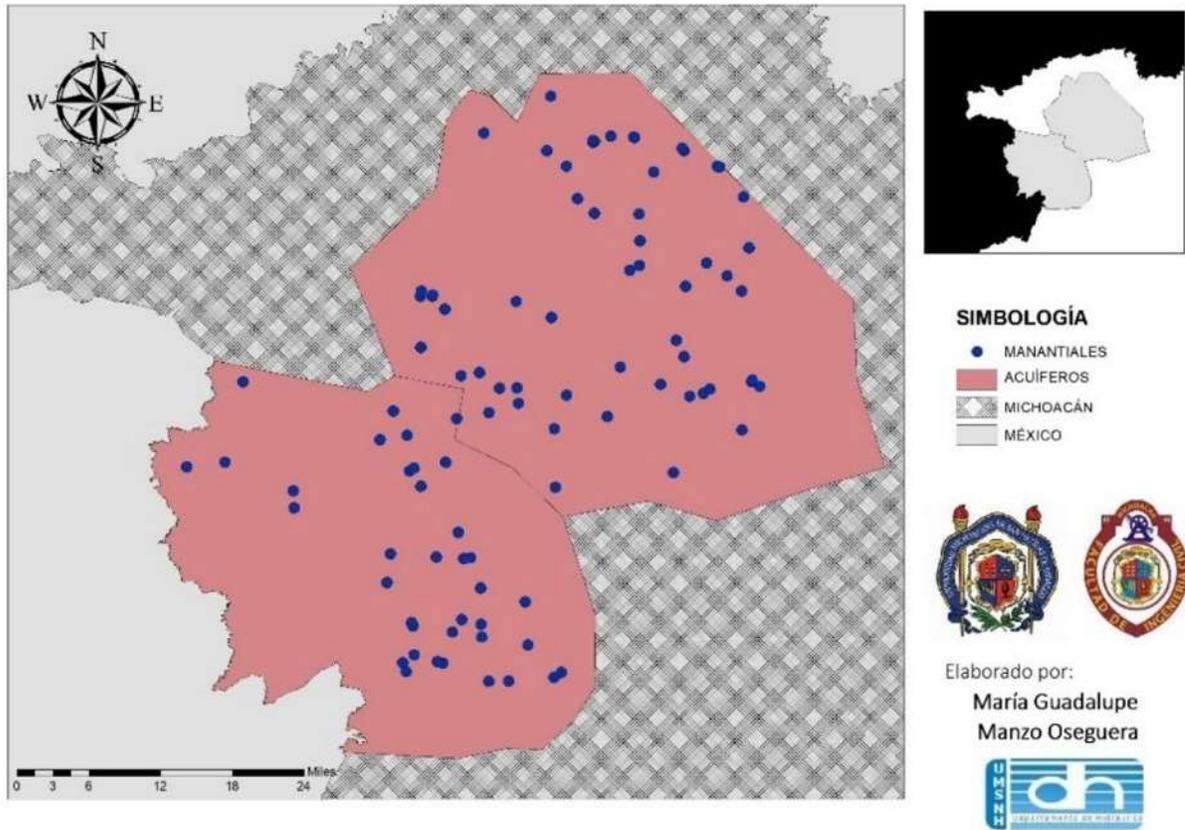


Figura 44. Manantiales dentro de los acuíferos estudiados.

7.4.2. POZOS DE EXTRACCIÓN

Una parte importante para la modelación subterránea es tener conocimiento de la localización de los pozos de extracción, así también como el volumen de extracción concesionado dentro de los acuíferos que estamos estudiando, esta información se consultó en la base de datos nacional del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA).

En la Figura 45 se mostrará, los 1310 registros de concesiones que se encuentran dentro de los acuíferos de Zamora y de Cotija, de los cuales el mayor porcentaje de volumen total extraído es destinado al uso agrícola.

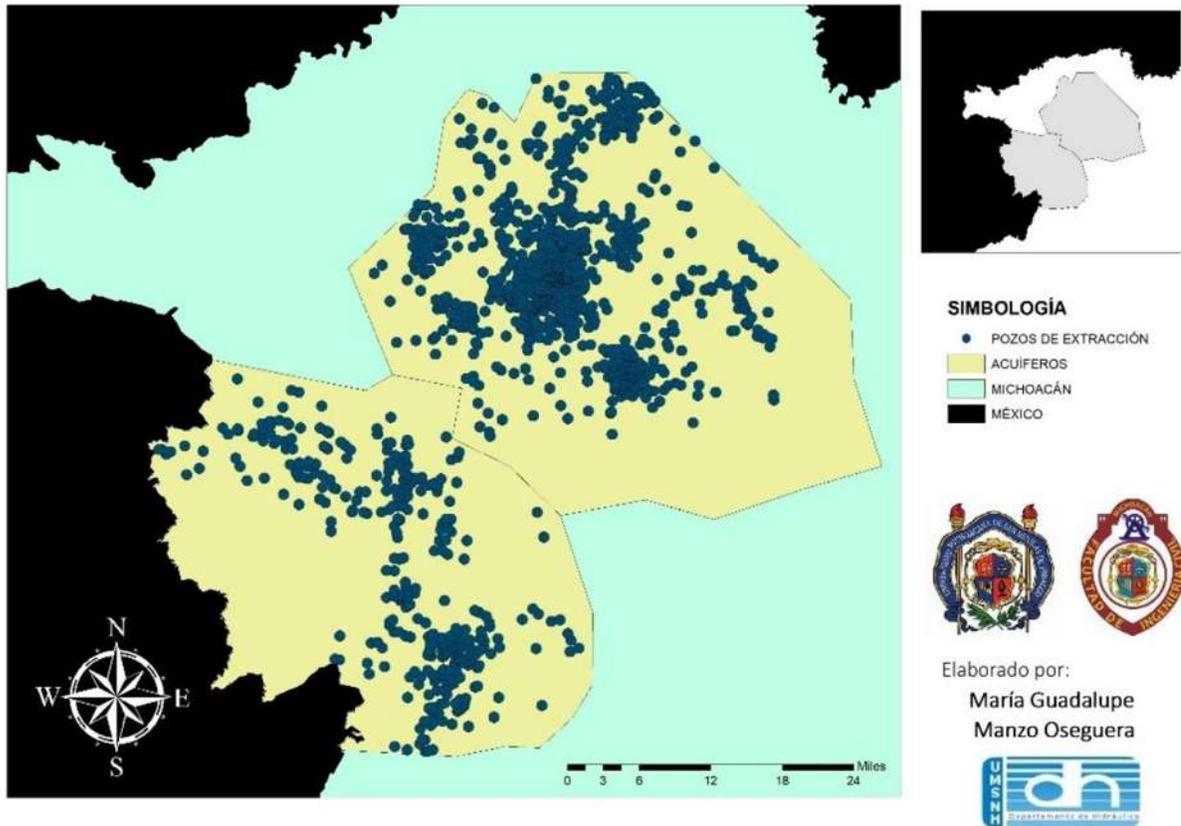


Figura 45. Pozos de extracción en los acuíferos de Zamora y Cotija.

Los pozos están distribuidos en 3 zonas en el acuífero de Cotija las cuales comprenden municipios como, Peribán y Los Reyes, Tingüindín, y Cotija, siendo la zona con mayores pozos en el municipio de Peribán, debido a el cultivo de aguacate este acuífero anualmente extrae 43.51 Hm³. Mientras que, en el acuífero de Zamora, tienen concentraciones en los municipios de Zamora, Tangancícuaro y Ecuandureo y este acuífero extrae 143.96 Hm³.

7.4.3. NIVELES PIEZOMÉTRICOS

Los registros de niveles piezométricos en el país no son controlados y de buena calidad, tienen cierto grado de incertidumbre y son muy pocos pozos los que cuentan con esta información. Dentro de la zona estudiada, de los 1310 pozos de extracción registrados solo son 73 pozos los que cuentan con este registro de nivel piezométrico. Estos se encuentran ubicados en la Figura 46.

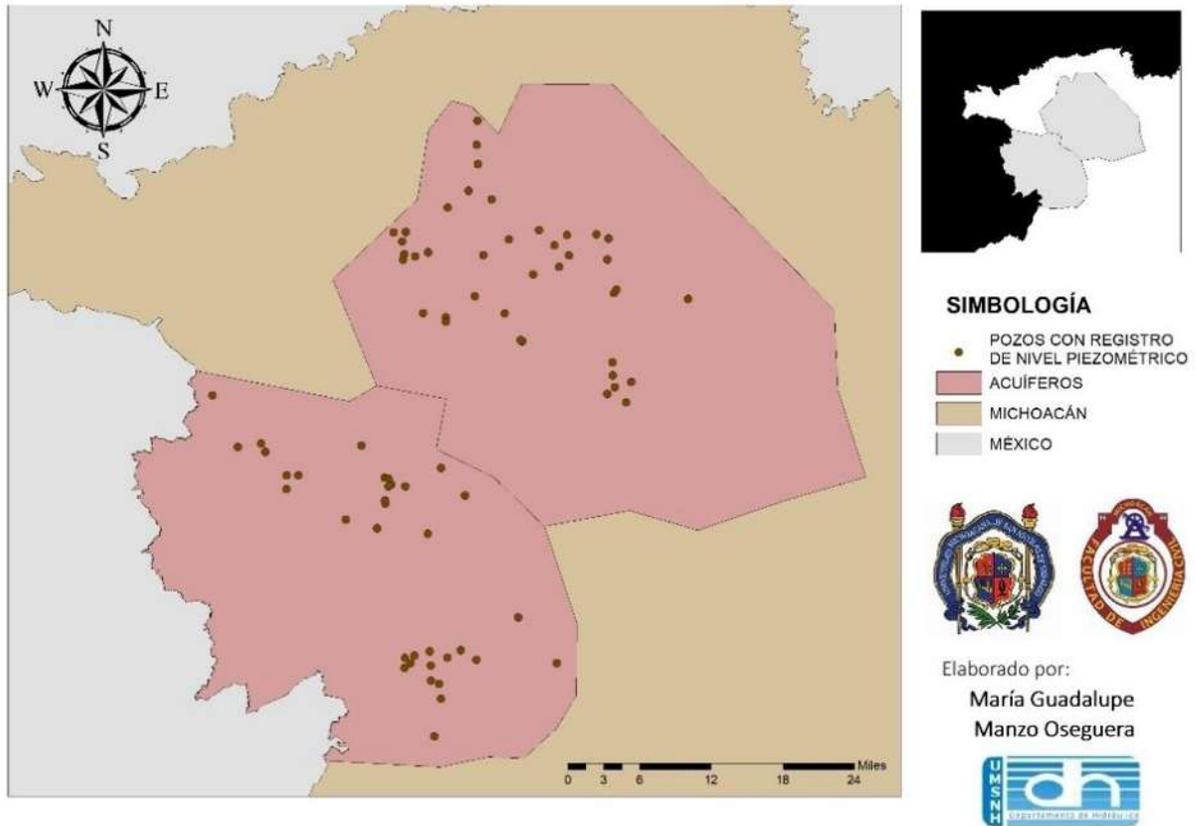


Figura 46. Pozos con registro de nivel Piezométrico en los acuíferos.

7.4.4. MAPA NIVEL ESTÁTICO

Con base a la información de Comisión Nacional del Agua se realizó un mapa del nivel estático para poder apreciar el movimiento del agua.

Las zonas de recarga del acuífero de Zamora se encuentran en las zonas altas, mientras que en el acuífero de Cotija, la principal zona de recarga, se encuentra en el pico de Tancítaro donde también es una zona alta.

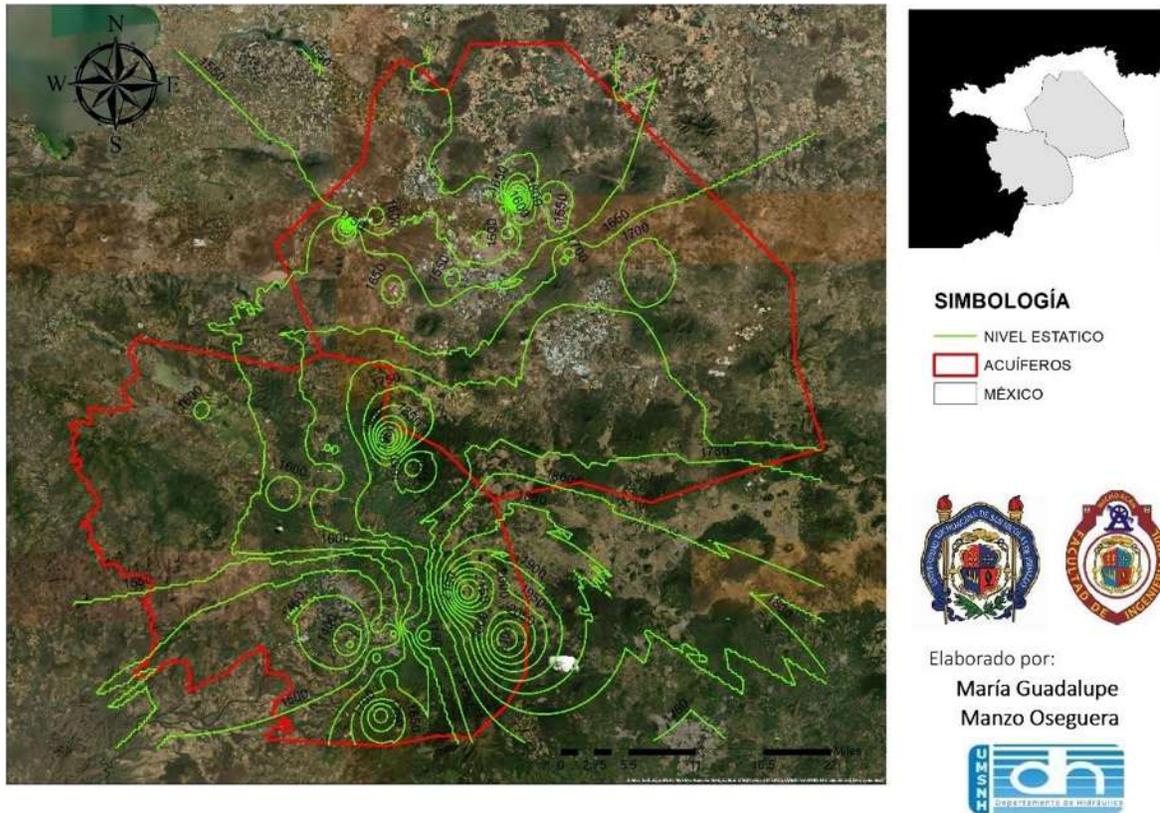


Figura 47. Comportamiento de nivel estático, según datos de CONAGUA.

7.5. MODELO EN MODFLOW

MODFLOW es un software que trabaja con modelos en forma distribuida, por lo que se requiere del ingreso de varios paquetes en forma de matrices los cuales son:

- Dimensión de la malla.
- Celdas activas, inactivas y de nivel constante.
- Nivel del terreno y fondo del acuífero.
- Nivel estático.
- Extracciones e infiltraciones.
- Manantiales.
- Conductividad, porosidad y almacenamiento.

Para realizar la discretización del modelo, es necesario definir una malla, para esto se tomó la decisión de que cada celda va a tener la resolución de 2km por 2km y constará de una matriz que tendrá 51 filas y 47 columnas, como se muestra en la figura 47. El mallado se definió con esas dimensiones para tener una discretización más detallada de las condiciones del acuífero Figura 48.

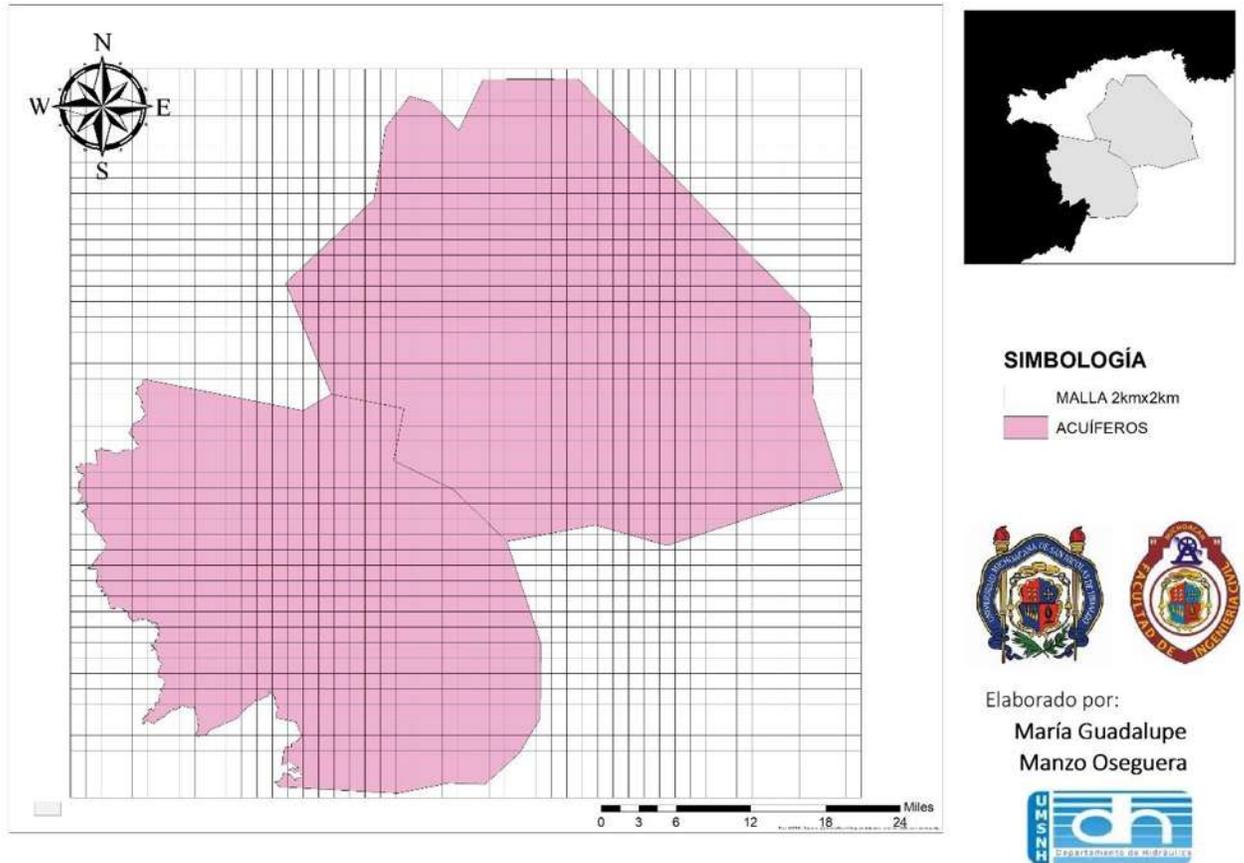


Figura 48. Mallado en los acuíferos de Zamora y Cotija con 2km x 2 km.

Posteriormente en Excel se realizaron las matrices correspondientes para alimentar el modelo e identificar las zonas de recarga.

En la Figura 49 se muestra la matriz de condiciones de entorno, las celdas activas e inactivas ya que no se consideró el nivel constante (Cuerpos de agua) esto para integrar la variable IBOUND dentro de Modflow. Estas celdas nos indicaran las condiciones de entorno del acuífero, activas (presencia del acuífero), inactivas (zona en la que no se realizaran cálculos) Nivel constante (cuerpos de agua). A continuación, se presenta la matriz en la siguiente figura.

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

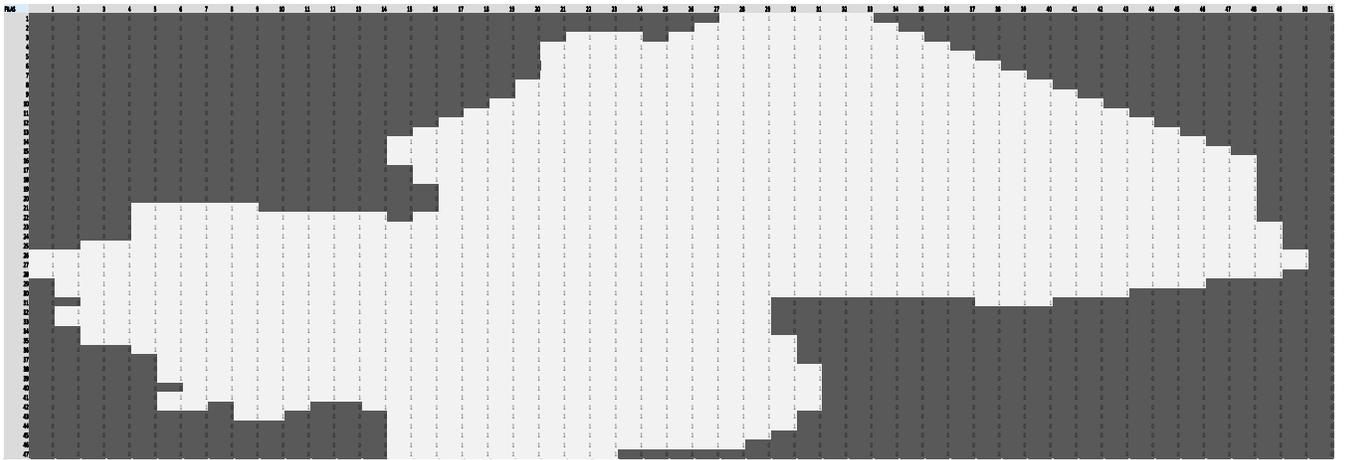


Figura 49. Matriz de condiciones de entorno en Excel.

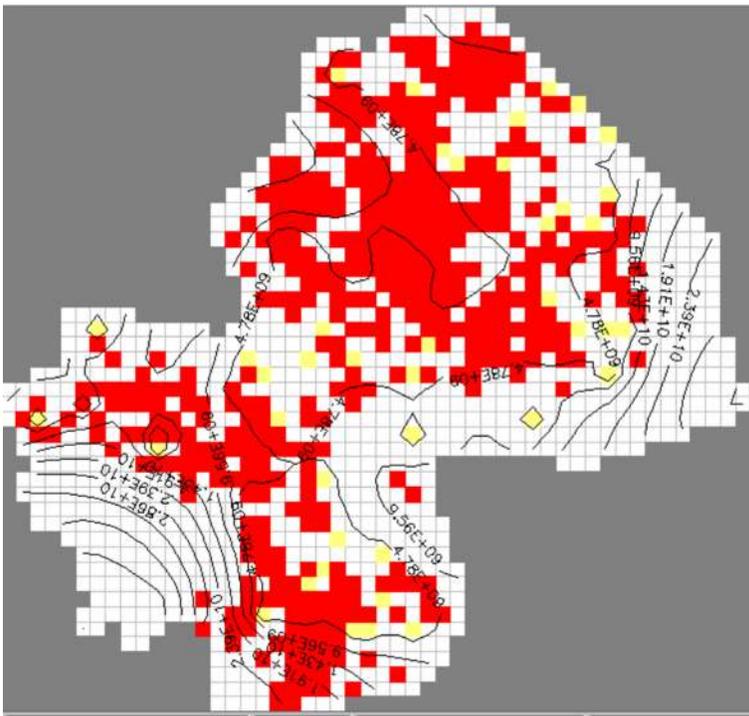


Figura 50. Resultados de niveles simulados en Modflow.

8. CONCLUSIONES

Dada los escasos de agua en dulce en el planeta es muy importante hacer conciencia en la sociedad y cuidar de este vital líquido. La importancia de un buen manejo del recurso es algo esencial en nuestro país y en el planeta.

Realizar un modelo hidrológico que simule las condiciones de un sistema real es una tarea compleja, debido principalmente a la escasez de información. Por ello es necesario llevar a cabo una etapa de gestión y validación de la información utilizada.

La calibración realizada para obtener los resultados del balance hídrico fue una calibración satisfactoria, ya que los rangos de ajuste recomendados estuvieron por arriba de 0.5, se logró asemejar bastante bien los datos generados con los observados, lo cual nos confirma que estamos generando un modelo fiable, y los resultados obtenidos del balance hídrico se pueden considerar como resultados muy buenos ya que la información con la que se elaboró fue tratada y validada por las diferentes pruebas estadísticas, por lo que finalmente se pudo realizar una buena investigación pese a la falta de información necesaria para que dictaminemos que la investigación fue excelente.

Por la falta de información necesaria para el acuífero de Cotija, en el estudio de investigación se logró generar la serie de caudales, confiando en el trabajo de similitud hidrológica en comparación con la cuenca vecina, los caudales generados podrán usarse para estudios posteriores, pero se hace la recomendación que se logre colocar al menos una estación hidrométrica que pueda utilizarse para estudios próximos al acuífero.

Conforme ha avanzado el tiempo ha aumentado la demanda y las extracciones de aguas subterráneas en ambos acuíferos, anteriormente en el acuífero de Zamora se tenía registro de 179 pozos de extracción subterránea en el año de 1977, 45 años después se tienen concesionados 1022 pozos de extracción de los cuales se extraen 143.96 Hm^3 .

Las zonas de recarga del acuífero de Zamora se encuentra en las zonas altas como es el Cerro de Piedra, en Atecuario de la Constitución, ubicado en el municipio de Zamora, y en el municipio de Chavinda, en los límites con Villamar, mientras que en el acuífero de Cotija, la principal zona de recarga, se encuentra en el pico de Tancítaro ubicado en la zona este del municipio de Peribán y Tancítaro, el cerro de la campana, ubicado en Nuevo San Juan Parangaricutiro y el cerro de Patamban también es una fuente importante de recarga al acuífero, se encuentra ubicado en el municipio de Tingüindín.

Los acuíferos estudiados en esta investigación son 2 de los 550 acuíferos en México que no sufren sobreexplotación, ya que al menos 103 de los 653 acuíferos mexicanos están en situación de la sobreexplotación, por los resultados del balance hídrico mostrado en las figuras (Figura 42 y Figura 43). Al determinar los recursos hídricos superficiales en la zona, fue posible determinar los volúmenes de recarga, los cuales fueron para el acuífero de Cotija de 222.38 hm^3 y se extraen anualmente 43.51 hm^3 de acuerdo a las concesiones de la Comisión

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

Nacional del Agua. Mientras que en Zamora el volumen de recarga es de 179.46 hm³ y la extracción anual de 143.96 hm³.

9. REFERENCIAS

- Alvar González, A. N. (12 de Enero de 2017). *Obtenido de Instituto Geominero de España*:
Obtenido de
https://aguas.igme.es/igme/publica/pdfjor_aguas_mine/1_conceptos.pdf
- Aranda, C. (1983). *Procesos del ciclo Hidrológico*. México D.F.
- Arellano, L. D. (2021). *MODELACIÓN DEL ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO CON MODFLOW*. MORELIA MICH: UMSNH.
- Arquiola, J. P. (2017). *Herramienta Evalhid para la evaluación de los recursos hidricos*. Valencia, España: UPV.
- Arrabal, J. A. (2015). Incorporación de la dinámica nival al modelo hidrológico de Témez para la evaluación de recursos hídricos en cuencas de alta montaña. Aplicación a la cuenca del río Bérchules (Sierra Nevada, Granada). *SIAGA*.
- Carballo, M. P. (2012). *Manual de Agua Subterranea*. Montevideo, Uruguay: M.G.A.P.
- Cely-Calixto, C.-S. B.-M. (2021). Validation of the modified Teméz rational model in the watersheds of Norte de Santander, Colombia. *The Electrochemical Society*.
- Cicese. (05 de 2022). *CLICOM*. Obtenido de CLICOM: <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- Cirelli, A. F. (2012). El agua: un recurso esencia. *Química Viva*, 147-170.
- CONABIO. (20 de MAYO de 2022). Obtenido de CONABIO:
<https://www.gob.mx/conabio/que-hacemos>
- CONAGUA. (2018). *ESTADÍSTICAS DEL AGUA EN MEXICO*. Ciudad de México.
- CONAGUA. (2020). *ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO ZAMORA (1608), ESTADO DE MICHOACÁN*. Ciudad de México: SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA GERENCIA DE AGUAS SUBTERRANEAS.
- CONAGUA. (2020). *ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO ZAMORA (1608), ESTADO DE MICHOACÁN*. CIUDAD DE MÉXICO: SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA GERENCIA DE AGUAS SUBTERRANEAS.
- Conagua. (2021). *Actuaizacion de la disponibilidad media anual del acuífero de Cotija (1622) en el estado de Michoacan*. CIUDAD DE MEXICO: GERENCIA DE AGUAS SUBTERRANEAS.
- Conagua. (2021). *Actualizacion de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zamora (1608), estado de Michoacán*. Ciudad de Mexico: Gerencia de aguas subterranas.

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

- Contreras, J. G. (2021). *EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO*. Morelia, Michoacán.
- Correa, G. (2015). *Determinacion de la concentracion de nitratos en escirrentia superficial y mantos acuíferos con modelación matematica*. Morelia Mich: UMSNH.
- Farfán, M. d. (2019). *EVALUACIÓN CON CAMBIO CLIMÁTICO DE ESCENARIOS DE DEMANDA. MORELIA MICHOACAN*.
- Ferreira, J. A. (2001). *COMPORTAMENTO DE UM MODELO HIDROLÓGICO PARA A BACIA AMAZÔNICAUTILIZANDO TRÊS CAMPOS DIFERENTES DE CLIMATOLOGIA*.
- Gálvez, J. J. (2011). *Aguas subterranas - acuíferos*. Lima, Perú: Sociedad Geográfica de Lima.
- Garcia, J. M. (2016). *COMPARATIVA DE LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-011-CONAGUA-2015 CON EL MODELO TÉMEZ*. LIMA, PERÚ.
- Granda, G. H. (2019). Evaluación de los recursos hídricos en la cuenca San Diego ante escenarios de cambio climático. *Ingeniería Agrícola*, 21-31.
- Harbaugh, A. W. (2005). *Reston, VA*.
- Harbaugh, A. W. (2005). MODFLOW-2005 the US geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process. *Reston, VA: US Departament of the iinterior, US Geological Survey*, 6-16.
- Hernández, J. M. (Dirección). (2022). *Como transformar los servicios de suministro de agua y saneamiento en un factor de bienestar y de desarrollo economico sostenible*. [Película].
- Ihobe, S. 2. (2006). *Guía técnica para la aplicación de modelos informaticos para el. ESPAÑA: Gobierno de Vasco*.
- Imta. (Febrero de 2011). *Gaceta del IMTA*. Obtenido de Haceta del IMTA: <https://www.imta.gob.mx/gaceta/anteriores/g46-02-2011/bandas.html>
- Imta. (2019). *Aguas subterranas*. Ciudad de Mexico: Gobierno de Mexico.
- Inegi. (2022). *inegi.org.mx*.
- Jesús, E. H. (2019). MODELING OF THE UNDERGROUND WATER RECHARGE OF THEUBERABINHA RIVER BASIN - UBERLÂNDIA - MG. *CAMINHOS DE GEOGRAFIA*, 311-330.
- LARA, E. L. (2018). LOS SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA. *ANDALUCIA EN EL UMBRAL DEL SIGLO XXI*.

“Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija”

- MARCK, J. A. (1986). *SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA. FUNCIONES Y ESTRUCTURAS DE DATOS*. New York: U.S. national Science Foundation.
- Mijares, F. J. (1989). *FUNDAMENTOS DE HIDROLOGIA DE SUPERFICIE*. MEXICO D.F: LIMUSA.
- Mijares, J. A. (2006). *Evaluación de los recursos*. Montevideo Uruguay: Unesco.
- Paredes, C. (2013). *Evaluacion del recurso hidrico en la cuenca Turia (España) mediante la aplicacion de modelos semiagregados de precipitacion escorrentía (memoria y anejos)*. Valencia, España: UPV.
- Pérez, C. L. (2021). *MODELACIÓN DEL ACUÍFERO CIÉNEGA PRIETA - MOROLEON EN MODFLOW*. Morelia, Michoacán: UMSNH.
- Rascon, L. E. (2005). *Principios de Hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico*. Ciudad de Mexico: UNAM, Serie textos universitarios.
- Salla, M. R. (2014). Application of the EVALHID tool for parameter calibration and flow simulation in the upper course of Araguari river, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 276-285.
- Urbina, O. L. (2018). *ANÁLISIS DEL TRANSPORTE DE NITRATOS MEDIANTE LA MODELACIÓN SUBTERRÁNEA (MODFLOW-MT3D) EN LOS ACUÍFEROS ZACAPU Y PASTOR ORTIZ (MICHOCÁN)*. Morelia Micho: UMSNH.