



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN  
NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**MODELACIÓN DEL ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO  
CON MODFLOW**

**TESIS**

Para obtener el grado de

**INGENIERO CIVIL**

PRESENTA

**LUIS DAVID NAVARRO ARELLANO**

ASESOR

**SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE**

Doctora en Ingeniería del Agua, Canales y Puertos

CO-ASESOR

**MARÍA DEL MAR NAVARRO FARFÁN**

Maestra en Ciencias de Ingeniería Ambiental



## DEDICATORIA

*A mi madre: Irma, de ella aprendí que por más difícil que esté la situación nunca debo de rendirme para salir adelante., Gracias por siempre estar conmigo cuando más necesitaba de ti.*

*A mi padre: Francisco Javier, por enseñarme que la educación es el mejor regalo que podrían darme como padres., Eres mi guía y mi mejor consejero.*

*A mis hermanos: Juana Lilia, Francisco Javier, Irma, Leonardo, Moisés y Jonathan Abraham, por ser mis compañeros de vida y servirme de inspiración para poder lograr mis metas, por creer en mí y así superarme día con día.*

*Gracias a ustedes me he forjado como la persona que soy hoy en día y es por eso que les dedico la culminación de este trabajo., He logrado todo lo que tengo por la confianza que han puesto en mí, estén seguros de que nunca los defraudaré.*





## AGRADECIMIENTOS

*A mis padres y hermanos., Por apoyarme durante toda mi vida, gracias a ustedes nunca me hizo falta nada y es por ustedes que tengo el mejor regalo que pudieron darme, mi carrera universitaria.*

*A la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe, Por ser una gran mentora durante mi carrera, gracias por siempre apoyarme y preocuparse por mi desarrollo personal y académico., Además de ser una excelente maestra es un gran ser humano, algún día espero llegar a ser como usted.*

*A Sergio Cázarez y Mar Farfán, por transmitirme sus conocimientos de la manera más amable y atenta, gracias por siempre estar ahí para resolver todas mis dudas, además de maestros los considero unos grandes amigos.*

*A mis compañeros y amigos, Elva Ramírez, Fernanda Rodríguez, Irving Ferreyra, Alejandro Morón, Mario Piñón, Roberto Nahúm, Liz García, Kevin Herrera, Nadia, Juan Daniel, Daniel Mejía, Ángel Flores, Olimpia Martínez, Lupita Oseguera, Emireth, Ivanhoe, Oscar Ramos, Daly, Albarrán y Oscar Cedeño., Con los que compartí esta etapa tan importante en nuestras vidas, confío en que cumpliremos nuestras metas y llegaremos a ser grandes profesionistas.*

*A todos mis maestros durante mi desarrollo académico por desempeñar su gran labor en la docencia, gracias a su conocimiento transmitido logré llegar hasta donde estoy.*





## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
ANTECEDENTES .....	2
GENERALIDADES DEL ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO .....	2
UBICACIÓN GEOGRÁFICA .....	2
SITUACIÓN ADMINISTRATIVA DEL ACUÍFERO .....	3
FISIOGRAFÍA .....	3
HIDROGRAFÍA .....	4
GOEMORFOLOGÍA.....	4
GEOLOGÍA.....	4
ESTRATIGRAFÍA .....	5
TIPO DE ACUÍFERO .....	5
PIEZOMETRÍA .....	6
CALIDAD DEL AGUA .....	6
JUSTIFICACIÓN .....	7
OBJETIVOS .....	8
OBJETIVO PRINCIPAL .....	8
OBJETIVOS PARTICULARES .....	8
MARCO TEÓRICO.....	9
CUENCA HIDROLÓGICA.....	9
PRECIPITACIÓN .....	9
ESTACIONES PLUVIMÉTRICAS .....	10
ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL.....	11
EVAPOTRANSPIRACIÓN .....	11
• Evaporación: .....	11
• Transpiración .....	11
INFILTRACIÓN .....	12
ACUÍFERO .....	13
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.....	13
MODELACIÓN HIDRÁULICA .....	14
MODELOS FÍSICOS.....	15





MODELOS MATEMÁTICOS..... 15

LIMITACIONES DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS ..... 16

CALIBRACIÓN ..... 16

DATOS DEL PROYECTO ..... 17

MATERIALES ..... 17

    SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA..... 17

    GESTIÓN ESTADÍSTICA DE DATOS CLIMATOLÓGICOS (GESTAD)..... 18

    MODFLOW ..... 24

    BASES DE DATOS ..... 36

METODOLOGÍA ..... 38

    CICLO HIDROLÓGICO ..... 38

    CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO ..... 40

    GESTIÓN DE DATOS ..... 41

    BALANCE HÍDRICO ..... 43

    MODELACIÓN SUBTERRÁNEA..... 47

    CALIBRACIÓN ..... 49

RESULTADOS..... 51

    ZONA DE ESTUDIO ..... 51

        UBICACIÓN POLÍTICA..... 51

        DELIMITACIÓN HIDROLÓGICA ..... 52

    GESTIÓN DE LOS DATOS CLIMATOLÓGICOS ..... 55

        SELECCIÓN DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS..... 55

        ESTACIONES PRINCIPALES ..... 56

        VALIDACIÓN DE LA INFORMACIÓN ..... 58

        SERIES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA ..... 59

    ANÁLISIS DEL BALANCE HÍDRICO ..... 61

        USO Y TIPO DE SUELO ..... 61

        PRECIPITACIÓN QUE ESCURRE ..... 65

        EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL..... 67

        INFILTRACIÓN..... 69

        DISTRITO DE RIEGO 020 MORELIA-QUERÉNDARO..... 70

    CARACTERIZACIÓN SUBTERRÁNEA ..... 71





EXTRACCIONES .....	71
MANANTIALES .....	73
VOLUMEN TOTAL CONCESIONADO .....	75
GEOLOGÍA DEL ACUÍFERO .....	76
NIVEL ESTÁTICO .....	78
MODELO EN MODFLOW.....	79
CONCLUSIONES.....	85
BIBLIOGRAFÍAS .....	87





## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Discretización del modelo a partir de celdas, dividido en columnas, filas y capas. Adaptado de Harbaugh (2005). .....	25
Figura 2. Incisos para las seis celdas que rodean la celda i,j,k (escondida). (Modificado de McDonald and Harbaugh, 2005).....	26
Figura 3. Flujo de la celda i,j,k, proveniente de la celda i,j-1,k (Modificado de McDonald y Harbaugh, 2005).....	27
Figura 4. Representación conceptual de las aportaciones a través del lecho del río hacia una celda. Modificado de Harbaugh (2005). .....	30
Figura 5. Discretización del acuífero mostrando las designaciones de las celdas y las condiciones de contorno. (Modificado de McDonald y Harbauhg, 2005). .....	34
Figura 6. Esquema de discretización vertical (de McDonald y Habaugh, 2005) ...	35
Figura 7 Representación del ciclo hidrológico. Crédito de imagen: El ciclo del agua de NOAA National Weather Service Jetstream, CC BY 2.0 .....	39
Figura 8, Metodología propuesta para la modelación del acuífero.....	40
Figura 9. Pruebas estadísticas utilizadas en las series de precipitación.....	43
Figura 10. Paquetes en forma de malla con los que se conceptualiza el modelo en MPDFLOW.....	47
Figura 11. Ubicación política del acuífero 1602 Morelia-Queréndaro.....	51
Figura 12. Ubicación Hidrológica del acuífero Morelia-Queréndaro, ubicado en la Región Hidrológica 12 Lerma Santiago.....	52
Figura 13. Ubicación Hidrológica del acuífero Morelia-Queréndaro Localizado en la cuenca 51 Lago de Pátzcuaro y Lago de Yuriria.....	53
Figura 14. Sistema de corrientes del acuífero Morelia-Queréndaro. ....	54
Figura 15. 31 estaciones con buena información climatológica. ....	56
Figura 16. Estaciones climatológicas principales con información de 1985 y hasta el 2010. ....	57
Figura 17. Mapa de uso de suelo en la superficie del acuífero. ....	61
Figura 18. Mapa de tipo de suelo, en el cual destacan los acrisoles y vertisoles. .	62
Figura 19. Mapa del parámetro K del acuífero Morelia-Queréndaro. ....	63
Figura 20. Mapa del Coeficiente de escurrimiento (Ce). ....	64





Figura 21. Precipitación anual para el año 1995. .... 65

Figura 22. Mapa de precipitación que escurre en el acuífero para el año de 1995.  
..... 66

Figura 23. Evapotranspiración real de la zona de estudio, para el año de 1995... 68

Figura 24. Infiltración anual para el año 1995. .... 69

Figura 25. Distrito de riego 020 Morelia-Queréndaro. .... 70

Figura 26. Distribución de los pozos de extracción en el acuífero Morelia-Queréndaro. .... 71

Figura 27. Representación del volumen concesionado por extracción para cada uso consuntivo. .... 72

Figura 28. Localización de las concesiones por manantiales. .... 73

Figura 29. Representación del volumen concesionado por manantiales para cada uso consuntivo. .... 74

Figura 30. Volumen acumulado paraca cada uso consuntivo. .... 75

Figura 31. Representación del volumen total acumulado que es concesionado para los diferentes usos consuntivos..... 76

Figura 32. Geología presente en el acuífero Morelia-Queréndaro. .... 77

Figura 33. Mapa del comportamiento del nivel estático según datos de la CONAGUA. .... 78

Figura 34. Gráfica de la comparación del nivel estático contra la topografía del rio Grande. .... 79

Figura 35. Discretización del acuífero Morelia-Queréndaro para ser usado en el software MODFLOW. .... 80

Figura 36. Mapa de la representación de todas las acciones elementales por las que estará sometido el modelo en MODFLOW..... 81

Figura 37. Nivel estático simulado en el software MPDFLOW. .... 82

Figura 38. Comparación del nivel estático contra el nivel simulado del acuífero... 83





## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Rango de datos permisible (U) dependiendo del número de muestras (N). .....	21
Tabla 2. Valores de Ka dependiendo del mes y la ubicación en grados. ....	46
Tabla 3. Calidad de ajuste.....	50
Tabla 4 Municipios de Michoacán que se encuentra sobre el acuífero Morelia- Queréndaro. ....	51
Tabla 5. Información para la localización de las estaciones principales.....	57
Tabla 6. Resultados de las pruebas estadísticas realizados por el software GESTAD.....	58
Tabla 7. Precipitación media anual en el periodo de 1985-2010.....	59
Tabla 8. Precipitaciones registradas durante el año 1995.....	60
Tabla 9. Temperatura promedio anual registrada por las estaciones principales en el año 1995.....	60
Tabla 10. Ejemplo de cálculo de la evapotranspiración real para la estación 16123. .....	67
Tabla 11. Evapotranspiración real de las estaciones principales, durante el año de 1995. ....	67
Tabla 12. Volumen concesionado por extracción para los distintos usos consuntivos en el acuífero Morelia-Queréndaro.....	72
Tabla 13. Volumen por manantiales concesionado para los distintos usos consuntivos en el acuífero Morelia-Queréndaro.....	74
Tabla 14. Volumen total concesionado del acuífero Morelia-Queréndaro.....	75
Tabla 15. Rango de valores de porosidad y conductividad hidráulica.....	77
Tabla 16. Diferencia entre el nivel observado contra el nivel simulado de los pozos de control.....	82
Tabla 17. Resultados de las pruebas de bondad de ajuste.....	84





## RESUMEN

Desde que el hombre dejó de ser nómada, buscó establecerse en entornos donde pudiera acceder con facilidad al agua, obteniendo el recurso en régimen natural; con el paso de los años las pequeñas civilizaciones se convirtieron en grandes zonas urbanas, lo que provocó que el recurso superficial comenzara a escasear tanto en cantidad como en calidad; esto provocó el buscar nuevas fuentes para satisfacer las necesidades hídricas, dando paso a la extracción por bombeo. En un principio, resultó factible dado que los niveles freáticos estaban muy cercanos a la superficie, pero, a medida que las poblaciones crecían, la demanda hídrica aumentaba y, como no se tenía conocimiento adecuado de los acuíferos, se tuvo una mala gestión en las extracciones, lo que provocó que los niveles freáticos comenzaran a descender, haciendo que, para ciertos pozos fuera imposible la extracción.

Es por eso que con esta investigación se busca generar un modelo de las aguas subterráneas del acuífero Morelia-Queréndaro el cual sirva como modelo de gestión en el cual se puedan localizar las principales zonas afectadas; además, poder anticipar los problemas futuros.

**Palabras clave: Acuífero, Modelación, Morelia-Queréndaro, Balance Hídrico, Gestión.**





## ABSTRAC

Since men stopped being nomads, they sought to establish themselves in environments where they could easily access water, obtaining the resource in a natural regime; over the years, small civilizations became large urban areas, which caused the surface resource to become scarce both in quantity and quality; this led to the search for new sources to satisfy water needs, giving way to pumping extraction. At first, this proved feasible because the water tables were very close to the surface but, as populations grew, the demand for water increased and, since there was no adequate knowledge of the aquifers, there was poor management of the extractions, which caused the water levels to begin to fall, making extraction impossible for certain wells.

That is why this research seeks to generate a model of the subway waters of the Morelia-Queréndaro aquifer that will serve as a management model in which the main affected areas can be located; in addition, it will allow us to anticipate future problems.

**Keywords: Aquifer, Modeling, Morelia-Queréndaro, Water balance, Water management.**





## INTRODUCCIÓN

Datos estiman que a nivel mundial se tiene una disposición promedio de agua anual de 1386 billones de  $\text{Hm}^3$ , de los cuales 35 billones son agua dulce representando un 2.5% del agua total. de este 2.5% el 70% no está disponible ya que se encuentra en glaciares, 10.5 millones representan las aguas subterráneas y únicamente 0.14 millones de  $\text{Hm}^3$  pertenecen al agua superficial en forma lagos, ríos., Representando menos del 1% del agua total en la tierra. (CONAGUA, 9 de octubre 2019)

En el año 1950 se contaba con una población mundial de aproximadamente 2536 millones de personas, de las cuales para el año del 2018 se aumentó a un total de 7632 millones, esto genera que a nivel mundial se presente una concentración de la población en las localidades urbanas. Este fenómeno generará que el agua potable disponible para el ser humano comience a disminuir (CONAGUA, 9 de octubre 2019).

El agua subterránea abastece a más del 50% de la población mundial y representa un 43% del agua para uso agrícola, es por esto que se estima que el 20% de los acuíferos mundialmente están en estado de sobreexplotación algunos efectos negativos que esto generará es: el hundimiento del suelo como en la ciudad de México, la intrusión de agua salada en muchos acuíferos costeros y principalmente los escasos del recurso (Agua, 2017).

Debido a toda esta problemática se han buscado formas de gestionar el recurso hídrico, es por eso que en México desde las últimas décadas ha analizado y elaborado balances hídricos en todos los acuíferos del país, aun con esto la información que se tiene sobre los acuíferos es muy escasa y en algunos casos nula.





## ANTECEDENTES

De acuerdo a (Martínez, 2006) las rocas desde un punto hidrogeológico se clasifican en:

- **Acuíferos**, que son las rocas que pueden almacenar y transmitir agua en grandes cantidades.
- **Acuitardos**, Son los que, igual que los acuíferos tienen la capacidad de almacenar agua, pero la transmiten lentamente.
- **Acuicludos**, tienen la capacidad de almacenar agua, pero prácticamente es nula su transmisión.
- **Acuífugos**, estos no almacenan y no transmiten agua.

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 (Navarro, 2017).

## GENERALIDADES DEL ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO

### UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El acuífero Morelia-Queréndaro, definido con la clave 1602 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de Agua Subterránea (SIGMAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), se ubica en la porción noreste del estado de Michoacán, entre los paralelos 19° 26' y 20° 08' de la latitud norte y los meridianos 100° 38' y 101° 29' (CONAGUA, 20 de Abril 2015).





## SITUACIÓN ADMINISTRATIVA DEL ACUÍFERO

El acuífero actualmente se encuentra totalmente vedado y sujeto bajo la disposición de cuatro decretos. Al oriente por el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo de los terrenos que ocupa y circunda la Laguna de Los Azufres, en el Estado de Michoacán”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 13 de febrero de 1956. El centro del acuífero por el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende los municipios de Morelia y Charo, Michoacán.”, publicado en el DOF el 10 de febrero de 1964. Al suroeste por el “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuífero en la zona del Bajo Balsas, estableciéndose veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento de aguas del subsuelo en dicha zona”, publicado en el DOF el 27 de junio de 1975 y el resto del acuífero por el “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de mantos acuíferos y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en todos los municipios del estado de Michoacán”, publicado en 20 de octubre de 1987 (CONAGUA, 20 de Abril 2015).

De los decretos mencionados con anterioridad tres están clasificados como tipo III los cuales permiten las extracciones reguladas para usos domésticos, industriales y de riego, el que se encuentra en la zona del bajo balsas clasifica como tipo II el cual sólo permite la extracción regulada para el uso doméstico.

## FISIOGRAFÍA

El acuífero Morelia-Queréndaro se localiza en la provincia fisiográfica eje Neovolcánico, cubre parte de tres subprovincias, Neovolcánica Tarasca, Sierras y Bajíos Michoacanos, y Mil cumbres., Este eje está representado por grandes expresiones de vulcanismo explosivo, originado durante eventos relativamente recientes; la segunda, alcanza desarrollo significativo de sistemas de fallas asociado con manifestaciones volcánicas y fosas (CONAGUA, 20 de Abril 2015).





Estas subprovincias se caracterizan por tener grandes llanuras, y suelos de origen volcánico en el cual destacan rocas basálticas, brechas, suelos gruesos, pedregosos y con tipos de suelo principalmente vertisoles y andosoles así como suelos rojos arcillosos.

### HIDROGRAFÍA

El acuífero se encuentra en la región hidrológica número 12, Lerma Santiago donde las alturas de las cuencas oscilan entre los 1800 y 3000 m.s.n.m. Donde el río principal de la zona es el Río Grande de Morelia el cual Comienza desde la zona sur del acuífero y se dirige hacia las planicies de la zona norte, descargando en el lago de Cuitzeo.

### GOEMORFOLOGÍA

El acuífero está constituido principalmente por dos unidades morfológicas, las cuales son montañas que llegan hasta los 3400 m.s.n.m. (en la periferia sur del acuífero) y valles en la zona centro y norte del acuífero con elevaciones entre los 1800 m.s.n.m., La zona está constituida principalmente por una red de arroyos intermitentes las cuales desembocan al lago de Cuitzeo y al río Grande de Morelia generando una red de drenaje dendrítica con dirección al lago de Cuitzeo.

### GEOLOGÍA

En esta región se encuentran muchos sistemas de fallas las cuales dieron origen al valle donde se encuentra el sistema acuífero, en el cual destacan rocas de tipo ígneo extrusivo además de depósitos aluviales concentrados en la zona del lago (CONAGUA, 20 de Abril 2015).





## ESTRATIGRAFÍA

Las unidades estratigráficas que destacan en la zona son:

- **Rocas ígneas.** Estas se encuentran en la parte sureste del acuífero y en la ribera del lago.
- **Derrames andesíticos.** Se encuentran principalmente en al noreste del poblado de Tarímbaro y en los límites del poblado Cañada del Herrero.
- **Derrames de lavas y brechas.** Localizadas en la porción norte del acuífero y en la barranca del arroyo Uval.
- **Ignimbritas y tobas riolíticas.** Estas se ubican principalmente en la ciudad de Morelia teniendo una mayor concentración hacia el poniente de la misma.
- **Depositos lacustres, gravas, arenas y limos.** Estos se encuentran distribuidos en toda el área generalmente en las partes altas (gravas y arenas), los depósitos y los limos se encuentran ubicados en el fondo del lago de Cuitzeo y en el valle de Morelia-Álvaro Obregón.  
(CONAGUA, 20 de Abril 2015).

## TIPO DE ACUÍFERO

En base a la información de diferentes estudios realizados en materia geológica e hidrogeológica se determinó la existencia de un acuífero heterogéneo y anisótropo., Con heterogéneo hace referencia a un acuífero con diferentes conductividades hidráulicas en cada uno de sus puntos y con anisótropo se refiere a que la conductividad variará dependiendo de la dirección. El acuífero está formado por sedimentos arcillosos en la parte inferior del valle y sobre una capa de rocas volcánicas con permeabilidad primaria y secundaria, por lo que se puede estar hablando de un acuífero del tipo libre (CONAGUA, 20 de Abril 2015).





## PIEZOMETRÍA

Se contó con un registro de niveles estáticos realizados en el periodo de 1977 a 1992 añadiendo información del 2007 se pudo observar las variaciones que ha presentado el nivel del agua debido a las acciones por pozos de extracción., los valores de profundidad varían entre los 10 a 200 m, los valores mínimos se encuentran en el valle de Álvaro-Obregón y Huandacareo y los máximos en la ciudad de Morelia (CONAGUA, 20 de Abril 2015).

## CALIDAD DEL AGUA

El contenido iónico es de 176 a 761 ppm de sólidos disueltos totales y el estándar para el consumo humano es de 1000. En cuanto a esto, no ocasionará problemas de calidad para el uso y consumo humano, El 100% de las muestras están clasificadas como tipo S1, lo que representa agua con bajo contenido de sodio, también un 60% de estas muestras se clasifican como C2 (Salinidad moderada) la cual puede ser utilizada ara la irrigación de plantas (CONAGUA, 20 de Abril 2015).





## JUSTIFICACIÓN

La sobreexplotación de los acuíferos ocurre cuando se extrae más agua de la que este se le infiltra, datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2019) revelan que durante el 2017 en México se extrajeron un total de 34,385 millones de metros cúbicos.

Casi el 50% de las unidades de riego en México se ubicaron en zonas áridas y semiáridas, en el centro y norte del país, teniendo una superficie total de riego de 6.4 millones de hectáreas, lo que desde entonces ha colocado a México como el sexto lugar del mundo con infraestructura de riego (CONAGUA, 2010)., Michoacán siendo uno de los estados de la república que destacan por la producción agrícola requiere principalmente del agua subterránea para el riego de sus cultivos.

A su vez la población total en México se triplicó de 16 a 48 millones de habitantes entre los años 1930 y 1970, y el número de la población que residía en las ciudades se cuadruplicó de los 7 a los 27 millones. Lo que ocasionó una extracción a gran escala entre los años 1935 y 1966 cuando no se tenía conciencia de la importancia de los mantos acuíferos, no fue hasta el año 1975 que se presentó el Plan Nacional Hídrico donde se analizó que 32 acuíferos estaban en estado de sobreexplotación (CONAGUA, 2010).

A partir del 2001 el gobierno de México empezó a presentar un estudio individual para cada acuífero del país, pero aun con esto, muchos documentos se encuentran desactualizados y con información muy deficiente, en la actualidad México cuenta con un total de 653 acuíferos de los cuales 105 se encuentran en sobreexplotación lo que representaría el 16% de estos. debido a que las aguas subterráneas son de vital importancia en el desarrollo económico de las poblaciones, en esta investigación se pretende generar la caracterización del acuífero Morelia-Queréndaro con el fin de que pueda ser utilizado para analizar, evaluar y prevenir los distintos escenarios que se puedan presentar, además de la conceptualización de todas las acciones que intervienen en las aguas subterráneas.





## OBJETIVOS

### OBJETIVO PRINCIPAL

Caracterizar y calibrar un modelo de simulación de las aguas subterráneas del acuífero Morelia-Queréndaro con el fin de generar un modelo el cual pueda ser utilizado en estudios posteriores para la gestión del recurso hídrico o ver el comportamiento del mismo en distintos escenarios futuros.

### OBJETIVOS PARTICULARES

- a) Gestionar la información existente de las estaciones meteorológicas 50 km alrededor del acuífero por medio de distintas pruebas estadísticas para determinar su calidad.
- b) Elaborar un balance hídrico por medio de la NOM-011-CONAGUA-2015 con el fin de obtener la recarga anual del acuífero.
- c) Observar las principales zonas de recarga y descarga del acuífero Morelia-Queréndaro.
- d) Calibrar el modelo del acuífero Morelia-Queréndaro por medio del software processing modflow.





## MARCO TEÓRICO

Ya que en el presente estudio se hace uso de mucho lenguaje técnico además del uso de diferentes softwares especializados en el área hidrológica., Es necesario tener en cuenta los conceptos básicos con el fin de que se pueda conceptualizar físicamente los fenómenos y como repercuten en el modelo.

## CUENCA HIDROLÓGICA

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida, la cuenca está delimitada por un parteaguas, el cual es una línea imaginaria formada por los puntos con mayor nivel topográfico el cual también la separa con otras cuencas vecinas, desde el punto de vista de su salida se clasifican en do tipos: endorreicas y exorreicas, en la primera el punto de salida (la dirección en la que se dirige la esorrentía) se encuentra dentro de la cuenca generalmente en lagos, en la segunda el punto de salida se localiza en un extremo de la cuenca, descargando principalmente en alguna otra corriente principal o hacia el mar (Aparicio, 1992).

## PRECIPITACIÓN

La precipitación es la acción de la caída del agua hacia la tierra.

Para la hidrología, la precipitación es la principal fuente de agua para la superficie terrestre, y su medición genera un mejor control y uso del recurso gracias a los distintos estudios elaborados (Aparicio, 1992).





## ESTACIONES PLUVIMÉTRICAS

Estos son aparatos destinados a medir la precipitación ocurrida en un lapso de tiempo determinado, los pluviómetros registran el volumen total de una precipitación, pero no registran la distribución de esta durante el tiempo de la lluvia, a diferencia de estos, los pluviógrafos generan una gráfica (Pluviograma) de la cual se puede observar el comportamiento de la precipitación durante un lapso de tiempo determinado (Martínez, 2006).

Los datos que se pueden obtener de un pluviograma son:

- Volumen de la precipitación.
- Intensidad máxima de la tormenta.
- Hora del Principio y fin de la tormenta.
- Curva de intensidad-duración.

En México la mayoría de las estaciones que se cuentan son meteorológicas las cuales llevan un registro diario de la precipitación medida en mm/día, temperatura, etc. estas estaciones solo cuentan con un pluviómetro por lo que en la mayoría de las veces no se tiene registro del comportamiento de las tormentas ocurridas en el transcurso del tiempo.

Esta información de precipitación obtenida de las estaciones meteorológicas en México antes de usarse para cualquier estudio hidrológico debe ser tratada por diferentes pruebas estadísticas para así confirmar que las series si corresponden a series de precipitación, esto debido a que los registros se hacen manualmente por personas que van a las estaciones y toman la medición de la lluvia por lo que algunas veces estos datos suelen promediarlos o inclusive más grave inventárselos.





## ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

El escurrimiento se puede definir como el agua que proviene de la precipitación la cual circula sobre o bajo la superficie terrestre por medio de una corriente, y esta la dirige hasta el punto de salida de la cuenca., En el caso de las cuencas exorreicas esta escorrentía principalmente se lleva a cabo por medio de una serie de corrientes tributarias las cuales se conectan y descargan a la corriente principal. Este proceso ocurre cuando las capas superiores de la tierra comienzan a saturarse de agua provocando un flujo sobre ellas, a este tipo de escurrimiento se le conoce como flujo superficial una vez que este flujo llega a algún cauce bien definido (ríos o arroyos) se convierte en escorrentías. Este tipo de escurrimiento llega más rápido hasta el punto de salida de la cuenca, por eso se le relaciona directamente como el producto de una tormenta en particular y se puede decir que es el agua en exceso debido a la tormenta (Aparicio, 1992).

## EVAPOTRANSPIRACIÓN

- **Evaporación:** Se define como el proceso en el cual el agua almacenada en el suelo, lagos, ríos etc., pasa de estado líquido a gaseoso elevándose hacia la atmosfera.
- **Transpiración:** Se define como el agua que es expulsada por las plantas en forma de vapor.

Por lo que se puede decir que la evapotranspiración es la cantidad de agua que se transfiere a la atmósfera, ya sea por evaporación directa de un cuerpo de agua o alguna capa superficial de la tierra y la transpiración de las plantas (Martínez, 2006).

La evaporación y la transpiración se determinan en conjunto debido a que intervienen muchos factores como son la precipitación, la radiación solar, humedad del aire densidad de las plantas y todo lo referente a la capacidad que tiene el suelo para almacenar el agua.





## INFILTRACIÓN

La infiltración se define como el movimiento del agua hacia el suelo a través de la superficie terrestre bajo la acción de la gravedad y capilaridad., esta es la diferencia entre la lluvia que ocurre en alguna cuenca y el agua que escurre en esta misma, a estos escurrimientos se les puede considerar como perdidas a la infiltración ya que no llegan a las capas profundas del suelo, esto debido a los obstáculos presentes como pueden ser la falta de vegetación, las calles pavimentadas y las grandes ciudades, las cuales obstaculizan la acción de infiltración.

la infiltración está ligada directamente con la relación lluvia escurrimiento por lo que juega un papel muy importante para el diseño de obras hidráulicas., Este volumen de infiltración suele ser varias veces mayor que el volumen de escurrimiento cuando en la cuenca no se encuentra un grado muy grande de urbanización (Martínez, 2006).

Según (Martínez, 2006) existen factores que destacan para la capacidad de infiltración del suelo los cuales son:

- La textura del suelo.
- Contenido de humedad inicial.
- Contenido de humedad de saturación.
- Cobertura vegetal.
- Uso de suelo.
- Aire atrapado
- Lavado del material fino.
- Compactación.
- Temperatura.





## ACUÍFERO

Como se había mencionado con anterioridad, un acuífero es un conjunto de sistemas geológicos con las mismas características y propiedades, el cual puede almacenar y transmitir agua con facilidad, estos son formados cuando el agua producto de la precipitación comienza a infiltrarse hacia el suelo generando grandes depósitos geológicos saturados de agua.

México actualmente se encuentra dividido en un total de 653 acuíferos, esta división se generó en base a los sistemas políticos para que estos fueran los encargados en llevar y regular la gestión de cada uno.

## CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

La gran complejidad para medir el movimiento del flujo en las aguas subterráneas radicaba en la medición de un vector velocidad, ya que en el medio en el que se encuentran los canales por los que circula el agua son distintos tanto en tamaño, forma y rugosidad., Por lo que asignar un vector velocidad para cada punto generaría una cantidad infinita de vectores velocidad. Entonces se podría decir que el movimiento del agua en el medio poroso sería una cuestión aleatoria y esto hacía una labor imposible para la medición de caudales, esto permaneció hasta 1856 cuando Henry Darcy, ingeniero francés enuncia una ley empírica que define el movimiento del agua a través de diversos tipos de arena. El caudal que circula por un tubo lleno de arena es directamente proporcional a la sección transversal al flujo y a la pérdida de potencial de presión a lo largo de flujo (Martínez, 2006).

La conductividad hidráulica se define como el caudal de agua que pasa a través de una superficie unitaria de acuífero bajo un gradiente hidráulico unidad, sus dimensiones son de longitud sobre tiempo (L/T) (Martínez, 2006).





## MODELACIÓN HIDRÁULICA

Durante el ámbito profesional ya sea de aplicación o de investigación se deben presentar soluciones a los distintos problemas que se presentan en la realidad, muchas veces estos problemas son resueltos fácilmente ya que se tiene mucha investigación y conocimiento empírico detrás de estos fenómenos, por lo que ya se cuenta con fórmulas muy acercadas a un resultado exacto, cuando hablamos de fenómenos hidráulicos esto se complica ya que estos son muy complejos ya que dependen de muchos factores que pueden alterar significativamente un resultado de otro es por esto que en muchos casos se requiere la elaboración de un modelo el cual pueda simular el fenómeno en estudio de una manera más simplificada pero con resultados confiables y cuantificables para la realidad.

Actualmente se cuenta con una gran variedad de modelos los cuales pueden ser para la representación de obras hidráulicas, infiltración y movimientos de agua en el medio poroso, flujo de ríos y transportes de sedimentos etc.

Dentro de los modelos de infiltraciones y movimientos de agua en el medio poroso, es usado principalmente para la representación y visualización del comportamiento del agua en el suelo también puede ser usado para analizar el transporte de agentes contaminantes entre acuíferos, debido a los agroquímicos producidos y utilizados por la agricultura.

Los modelos nos pueden ayudar para obtener una solución más económica para enfrentar y solucionar la necesidad a resolver.

Los modelos pueden clasificarse en dos principales grupos los cuales son: Modelos Físicos y Modelos Matemáticos.





## MODELOS FÍSICOS

El modelo físico es la representación de un fenómeno que puede ocurrir en alguna obra de ingeniería, este es una representación simplificada de la obra hidráulica a realizar, la cual va a permitir observar el fenómeno físico, los pros y contras del mismo, además de realizar cierto tipo de opciones y modificaciones para poder darle solución a posibles problemas de una forma sencilla y económica confirmando la viabilidad para ser elaborado en la realidad.

## MODELOS MATEMÁTICOS

Estos modelos son los que utilizan ecuaciones matemáticas las cuales representan el fenómeno a analizar de una manera más simple., Dentro de este tipo de modelos se encuentran 3 principales subtipos los cuales son:

- Determinísticos: En estos modelos no se considera la probabilidad de ocurrencia del fenómeno en estudio.
- Estocásticos: se utilizan variables aleatorias y de probabilidad para representar el fenómeno físico.
- De simulación numérica: En estos se emplean lo que son las ecuaciones diferenciales, estos necesitan condiciones de borde para poder iniciar con el análisis, estos resuelven y representan los fenómenos utilizando técnicas de métodos de diferencias finitas.

El método de diferencias finitas representa al modelo en una malla que puede estar formada por triangulo o cuadrados., en cada una de las intersecciones de esta malla es donde se busca encontrar la representación de un valor que cual podría ser el nivel del agua en el caso de los acuíferos, este modelo resulta muy factible ya que se puede discretizar el tamaño de la malla dependiendo de la complejidad del fenómeno a simular.





## LIMITACIONES DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

Algunas de las principales limitaciones de los modelos matemáticos son las siguientes:

- Depende de la capacidad de la memoria de la computadora, ya que los procesos que se realizan suelen tener muchas iteraciones.
- Velocidad.
- Disponibilidad de los coeficientes.
- Exactitud en los resultados.

Actualmente los modelos matemáticos son muy avanzados y resultan ser en algunos casos de accesibilidad sencilla y económica. Estos resultan ser muy efectivos cuando se quieren probar distintas soluciones debido a la rapidez con la que se pueden modificar los análisis, pero tienen una desventaja significativa, que se requiere de algunos análisis de laboratorio y estudios de campo para que se puede hacer una buena representación matemática y estos análisis resultan ser algo costosos.

## CALIBRACIÓN

Para que los modelos puedan representar de manera correcta el fenómeno en estudio, se debe hacer alguna calibración con el fin de comprobar que los resultados que está arrojando el programa son similares a la realidad y si no es el caso buscar los factores adecuados para que el modelo trabaje de manera correcta.

En el caso de la modelación subterránea principalmente los valores que se modifican son los de la conductividad hidráulica con el fin de que el programa arroje los niveles estáticos similares a lo medidos en campo, una vez que los valores de niveles estáticos coinciden con los niveles de campo, se dice que el modelo esta calibrado y está listo para realizar cualquier análisis.





## DATOS DEL PROYECTO

### MATERIALES

#### SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

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

Estos SIG almacenan la información de dos formas como datos vectoriales o como tipo raster.

#### *RASTER*

Este formato permite almacenar la información en forma de imagen, por medio de fotografía aérea, satelital etc. este sistema trabaja con celdas las cuales están definidas por un tamaño igual para todas en la cual contienen información, el tamaño de dichas celdas define el detalle de la información, entre más pequeña más detallada, pero aumenta su peso de almacenamiento. Principalmente es utilizado para definir las pendientes de una zona, altitud entre otras (Puerta, 2011).

#### *VECTORIAL*

De acuerdo a (Puerta, 2011) este formato es conocido principalmente como shape (shp), los cuales están representados por:

- Puntos: Está representado por coordenadas (X, Y, Z) no presenta dimensiones.
- Líneas: Está formado por una serie de puntos, este ya presenta una longitud.
- Polígonos: Está formado al igual que la línea por una serie de puntos, pero la diferencia es que su punto de inicio y de fin coinciden entre sí dando así a la generación de distintas figuras geométricas.





## ARCGIS

“ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Es la plataforma líder mundial para crear y utilizar Sistemas de Información Geográfica (SIG), ArcGIS es utilizada por personas de todo el mundo para poner el conocimiento geográfico al servicio de los sectores del gobierno, la empresa, la ciencia, la educación y los medios” (Esri, 2016).

ArcGIS nos permite:

- Crear y utilizar mapas.
- Compilar información geográfica.
- Administrar bases de datos geográficas.
- Resolver problemas con análisis espaciales.
- Conocer y compartir información mediante la geografía y la visualización.

En concreto ArcGIS es un sistema de información geográfica el cual permite modificar archivos tipo raster y shp, con la finalidad de que sean útiles para la elaboración de mapas, tablas y gráficos. Con los cuales se puedan analizar datos en los que se puedan observar rasgos, patrones y distribuciones las cuales nos ayuden a tomar decisiones sobre las distintas zonas de estudio.

## GESTIÓN ESTADÍSTICA DE DATOS CLIMATOLÓGICOS (GESTAD)

“GESTAD es un software desarrollado para facilitar el análisis, validación y llenado de datos climatológicos el cual tiene como base el programa Matlab, pero es ejecutable en cualquier computadora que cuente con sistema operativo Windows sin necesidad de tener instalado el Matlab” (Cázarez, 2021).





Este software fue desarrollado por el M.I. Sergio Eduardo Cázarez durante su transcurso en la maestría de ingeniería de los recursos hídricos con el fin de agilizar la gestión de la información climatológica.

(Cázarez, 2021) Dividió el software en varios en varios módulos los cuales son:

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

## 1. CARGADO DE DATOS

Antes de poder a usar el programa es necesario tener dos tipos de archivos.

“Un directorio el cual debe contar con la clave de las estaciones climatológicas a analizar, así como su coordenada “x”, coordenada “y”, y elevación en msnm, en este orden y con su encabezado correspondiente, dicho directorio debe guardarse en formato csv (archivo de valores delimitados por comas)” (Cázarez, 2021).

los archivos de datos de las estaciones climatológicas descargadas de la base de datos de CLICOM en formato (.mat)., Estos datos deben llevar como nombre la clave de la estación climatológica correspondiente (Cázarez, 2021).

Esta sección la diseñó con el fin de visualizar los datos de carga con los que trabajará el programa.





## 2. CRITERIOS DE DISCRIMINACIÓN DE DATOS

En este apartado el usuario debe seleccionar los criterios con los cuales va a delimitar las muestras, definiendo un número de datos máximos que pueden faltar en las series de precipitación y así poder descartar la información que no es suficiente para el estudio.

El software divide los meses en meses húmedos y meses secos con el fin de ser un poco más exigentes cuando haga falta algún mes húmedo y no tanto cuando haga falta algún mes seco.

## 3. ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE DATOS

En este apartado es donde se realizan las pruebas para la validación de datos de todas las estaciones cargadas., Esta validación está realizada dentro de cuatro niveles (inspección gráfica, homogeneidad, tendencia e independencia) (Cázarez, 2021).

Las pruebas que realiza el software son las siguientes:

- Gráficas
  - Media móvil.
- Homogeneidad.
  - Test de Secuencias
  - Test de Helmert.
  - Test T-Student.
  - Test de Cramer.
  - Test de Barlett.
- Tendencia.
  - Test de la pendiente de la recta de regresión.
  - Test de spearman.
  - Test de Mann Kendall.
- Dependencia.
  - Límites de Anderson.





- Wald-wolfowitz

### 3.1. MEDIA MOVIL

Este es un método gráfico que sirve para analizar el comportamiento de la serie histórica de precipitación, muchas veces es complicado ver el comportamiento de estas series, es por eso que se grafican las medias móviles para darnos una idea de si nuestra serie puede tener alguna tendencia y corroborarlo con otra prueba estadística.

### 3.2. TEST DE SECUENCIAS

Este test es un método que busca analizar los datos respecto de la mediana y contando el número de cambios presentes en la serie de datos consecutivos y con esto comprobar que el número de cambios (U) se encuentre dentro de los rangos establecidos para cada (N) datos.

Tabla 1 Rango de datos permisible (U) dependiendo del número de muestras (N).

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

### 3.3. TEST DE HELMERT

En este método se ordena la serie consecutiva en años y se analiza el signo de las desviaciones con respecto a la media aritmética de los datos donde los datos consecutivos (cuando estén de un mismo lado de la media, ya sea mayor o menor) son denominados (S) y cuando ocurre un cambio (pase de ser mayor que la media o viceversa) se le denominará (C). Este método debe aplicarse a la serie de datos mayor consecutiva, es decir no debe faltar un dato anual en el tramo escogido.





Una vez que se realiza el test se analiza que este cumpla el criterio con la siguiente Ecuación [1]:

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

Donde:

n = Número de datos.

S = Número de secuencias.

C = Número de Cambios.

### 3.4. PENDIENTE DE LA RECTA DE REGRESIÓN

Esta prueba consiste en determinar si hay tendencia en los datos a partir de ajustar una recta de regresión lineal simple determinada con el método de mínimos cuadrados como se muestra en la Ecuación [2]:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n xy - \sum_{i=1}^n y}{\sum_{i=1}^n x^2 - (\sum_{i=1}^n x)^2} \quad [2]$$

### 3.5. LIMITES DE ANDESON

La cuantificación de la auto correlación o independencia temporal se realiza con base en el coeficiente de correlación (rk) para un orden o desfase k el cual indica que tan fuerte está siendo afectado un evento por el anterior (campos, 2011).

El número de desfases corresponde al número de valores que tendrá el correlograma ( $\rho$ ), Ecuación [3], en la cual  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  son las desviaciones estándar de la serie X y Y, y n corresponde al número de datos de la muestra.

$$\rho = \beta \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad [3]$$

En donde  $\beta$  se calcula con la ecuación [4]

$$\beta = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad [4]$$





Una vez calculado esto se determina los límites de Anderson para un nivel de confianza del 95% mostrada en la Ecuación [5]

$$r_{k(95\%)} = \frac{-1 \pm 1.645\sqrt{n - k - 1}}{n - k} [5]$$

Para las estaciones meteorológicas, si menos del 10% de los valores del correlograma calculado superan los límites, se dice que la serie de datos es independiente (Navarro, 2019).

#### 4. SELECCIÓN DE LAS ESTACIONES PRINCIPALES

Después de someter las estaciones a los distintos criterios y pruebas estadísticas, el usuario debe escoger de las estaciones restantes, cuáles son las más aptas y con mejor información para ser las estaciones principales del estudio que se esté realizando (Cázarez, 2021)., Hecho esto el usuario debe ingresar las coordenadas UTM del centroide de la cuenca y asignar un valor de importancia (en porcentaje) a los siguientes parámetros:

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

Estos parámetros al sumarse deben llegar a la cantidad del 100%, el usuario dependiendo de los requisitos que busque moverá los valores a su conveniencia.

#### 5. LLENADO DE DATOS FALTANTES

En este apartado es donde se llenan los datos faltantes de las estaciones principales definiendo un mismo periodo histórico, requerido principalmente cuando se hacen análisis para gestionar el recurso hídrico.





El software cuenta con tres métodos de llenado los cuales son:

- Regresión lineal simple
- Regresión lineal múltiple
- IDW

El software ya tiene establecidas las restricciones para que se cumpla el llenado por cualquiera de los métodos, en caso de que no se pueda llenar algún dato de una estación por un método más avanzado, se recomienda bajar al inmediato inferior dentro de la gerarquía de estos tres siendo el IDW el más avanzado y la regresión simple el más sencillo.

### 6. VALIDACIÓN DE DATOS POST-LLENADO

“Esta última etapa tiene el mismo funcionamiento que la etapa de análisis y validación, con la variación de que la prueba se aplica a las estaciones llenadas con el objetivo de verificar si el llenado de los datos faltantes no alteró el comportamiento de la serie histórica” (Cázarez, 2021).

### MODFLOW

MODFLOW es un software que define el movimiento del flujo a través del medio poroso mediante el uso de ecuaciones diferenciales, simula el flujo constante y flujo no permanente en una representación de flujo irregular el cual puede estar dividido en distintas capas confinadas o semiconfinadas., Además es posible representar las acciones externas, como con: Recargas en el acuífero, Extracciones por pozos y manantiales, conductividades, transmisividades y el coeficiente de almacenamiento, el cual puede ser considerado como heterogéneo para todo el acuífero (Harbaugh, 2005).





Dentro de la elaboración del modelo este debe de ser discretizado por una malla en forma de celdas la que a su vez en conjunto con una serie de capas formarán bloques divididos en columnas, filas y capas., Dentro de esta discretización se delimita la forma y dimensiones del acuífero activando y desactivando las celdas requeridas en el modelo (Figura 1).

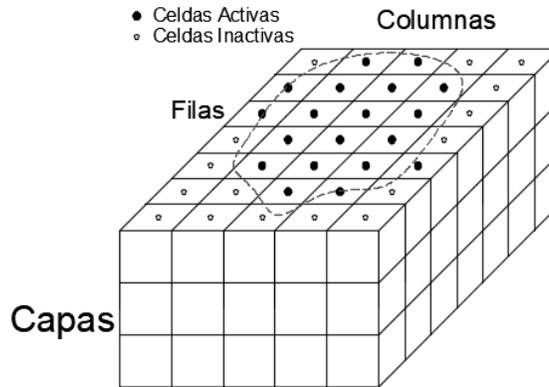


Figura 1.- Discretización del modelo a partir de celdas, dividido en columnas, filas y capas. Adaptado de Harbaugh (2005).

En donde el flujo del agua dentro del medio poroso puede estar representado por la Ecuación [6]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad [6]$$

Donde:

$K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  y  $K_{zz}$ : Representan los valores de conductividad hidráulica en las tres dimensiones en ( $LT^{-1}$ ).

$h$ : es la altura piezométrica en (L)

$W$ : Flujo que representa la entrada o salida de agua del sistema ( $T^{-1}$ ).

$S_s$ : Representa el almacenamiento específico del material poroso ( $1/L$ ).

Esta ecuación describe el flujo del agua en un medio poroso heterogéneo y anisótropo en régimen transitorio.





La ecuación de flujo de diferencias finitas, se deriva de la aplicación de la ecuación de continuidad a una unidad: la suma de todos los flujos que entran y salen de la unidad debe ser igual al cambio en la capacidad de almacenamiento. Suponiendo que la densidad del agua subterránea es constante, y considerando las condiciones iniciales y las condiciones de contorno, la ecuación de continuidad que representa el balance de flujo en la unidad Ecuación [7]:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad [7]$$

Donde:

$Q_i$ : Caudal entrante por una cara de la celda ( $L^3/T$ ).

$S_s$ : Almacenamiento específico ( $1/L$ ).

$\Delta v$ : Volumen de la celda ( $L^3$ ).

$\Delta h/\Delta t$ : Variación del potencial por unidad e peso ( $L$ ).

Como se observa hay seis celdas de adyacentes a la celda  $i,j,k$ . Esto considerando que las filas ( $i$ ), Columnas ( $j$ ) y capas ( $k$ ) por lo que se tienen las celdas adyacentes:  $i-1,j,k$ ;  $i+1,j,k$ ;  $i,j-1,k$ ;  $i,j+1,k$ ;  $i,j,k-1$ ;  $i,j,k+1$  Figura 2.

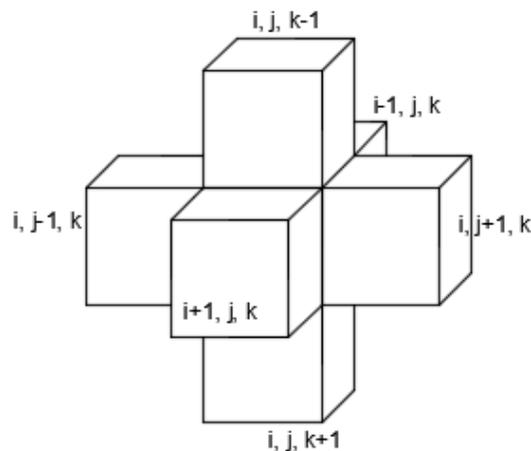


Figura 2. Incisos para las seis celdas que rodean la celda  $i,j,k$  (escondida). (Modificado de McDonald and Harbaugh, 2005)





Los flujos son considerados como positivos si estos entran a la celda  $i,j,k$ . Siguiendo esta convención el flujo en la celda  $i,j,k$  en la dirección de la flecha proveniente de la celda  $i,j-1,k$  (Figura 3), está dada por la ley de Darcy como la Ecuación [8].

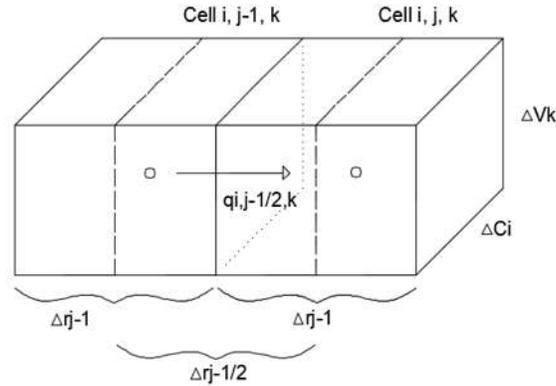


Figura 3. Flujo de la celda  $i,j,k$ , proveniente de la celda  $i,j-1,k$  (Modificado de McDonald y Harbaugh, 2005).

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \quad [8]$$

Donde:

$h_{i,j,k}$ : Es la altura en el nodo  $i,j,k$  y  $h_{i,j-1,k}$  es la altura en el nodo  $i,j-1,k$ .

$q_{i,j-1/2,k}$ : Es el flujo que pasa a través de la superficie de las celdas  $i,j,k$  y  $i,j-1,k$  ( $L^3T^{-1}$ ).

$KR_{i,j-1/2,k}$ : Es la conductividad hidráulica a lo largo de la fila entre los nodos  $i,j,k$  y  $i,j-1,k$  en ( $LT^{-1}$ ).

$\Delta c$ ,  $\Delta v_k$ : Es el área de la superficie de la celda en la dirección del flujo

$\Delta r_{j-1/2}$ : Representa la distancia que hay entre los nodos  $i,j,k$  y  $i,j-1,k$  en (L).

La Ecuación [3] nos da el flujo exacto para el caso unidimensional de estado estable, a través de un bloque acuífero extendiéndose desde el nodo  $i,j,k$  hasta el nodo  $i,j-1,k$ , y tiene un área de sección transversal de  $\Delta c$ ,  $\Delta v_k$ .

Las expresiones similares se pueden escribir aproximando el flujo dentro de la celda a través del resto en 5 fases, por ejemplo:

Para un flujo en la dirección de la flecha a través de la cara entre las celdas  $i,j,k$  y  $i,j+1,k$  Ecuación [9].





$$q_{i,j+1/2,k} = KR_{i,j+1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j+1/2}} \quad [9]$$

Mientras que para la dirección de la columna, el flujo en el bloque a través de la cara delantera está definido por la Ecuación [10].

$$q_{i+\frac{1}{2},j,k} = KC_{i+1/2,j,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{i+1/2}} \quad [10]$$

El Flujo en el bloque a través de la cara trasera está definido por la Ecuación [11].

$$q_{i-\frac{1}{2},j,k} = KC_{i-1/2,j,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{i-1/2}} \quad [11]$$

Para la dirección vertical, con flujo entre la cara de abajo se define por la Ecuación [12].

$$q_{i,j,k+1/2} = KV_{i,j,k+1/2} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{k+1/2}} \quad [12]$$

La Ecuación [13] Considera que las entradas de flujo son a través de la cara superior.

$$q_{i,j,k-1/2} = KV_{i,j,k-1/2} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{k-1/2}} \quad [13]$$

Cada una de las ecuaciones desde la 8 hasta la 11, representa las entradas del flujo de una cara de la celda  $i,j,k$ , en términos de la alturas, dimensiones de la cuadrícula y la conductividad hidráulica. En la Ecuación [14] la notación puede ser simplificada combinando las dimensiones de la malla y la conductividad hidráulica en una constante única, la Conductancia hidráulica, o más simple, la conductancia, por ejemplo:





$$CR_{i,j-1/2,k} = \frac{KR_{i,j-1/2,k}(\Delta c_i \Delta v_k)}{\Delta r_{j-1/2}} \quad [14]$$

Donde:

$CR_{i,j-1/2,k}$ : Es la conductancia en la fila  $i$  y la capa  $k$  entre los nodos  $i,j-1,k$  y  $i,j,k$  ( $L^2T^{-1}$ ).

As reescribiendo las ecuaciones anteriores desde la 9 hasta la 13, tenemos las siguientes, Ecuaciones [15] - [19].

$$q_{i,j+1/2,k} = CR_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \quad [15]$$

$$q_{i-\frac{1}{2},j,k} = CC_{i-\frac{1}{2},j,k}(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \quad [16]$$

$$q_{i+\frac{1}{2},j,k} = CC_{i+\frac{1}{2},j,k}(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) \quad [17]$$

$$q_{i,j,k-1/2} = CV_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) \quad [18]$$

$$q_{i,j,k+1/2} = CV_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \quad [19]$$

Para el conteo del flujo hacia la celda procedente de características o procesos externos al acuífero, como pueden ser, ríos, drenajes, recarga, evapotranspiración o pozos se requieren términos adicionales. Estos flujos pueden ser dependientes de la altura de la celda, pero independiente de todos los demás, o pueden ser totalmente independientes de la altura de la celda receptora. El flujo procedente del acuífero puede estar representado por la siguiente Ecuación [20].

$$a_{i,j,k,n} = P_{i,j,k,n}h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} \quad [20]$$

Donde:

$a_{i,j,k,n}$ : Representa el flujo externo hacia la celda  $i,j,k$  ( $L^3T^{-1}$ ).

$p_{i,j,k,n}$  y  $q_{i,j,k,n}$ : Son constantes en ( $L^2T^{-1}$ ) y ( $L^3T^{-1}$ ) respectivamente.





Por ejemplo suponemos que una celda está recibiendo un flujo proveniente de un pozo el cual asumimos que no depende de la altura entonces  $p_{i,j,k,n}$  es cero y  $q_{i,j,k,n}$  es la recarga por el pozo, esto se define en la Ecuación [21].

$$a_{i,j,k,1} = q_{i,j,k,1} \quad [21]$$

A partir del supuesto de que la interconexión río-acuífero puede tratarse como una simple conductancia, de modo que la infiltración es proporcional a la diferencia de la altura entre la etapa del río y la altura de la celda  $i,j,k$  como se muestra en la figura 4.

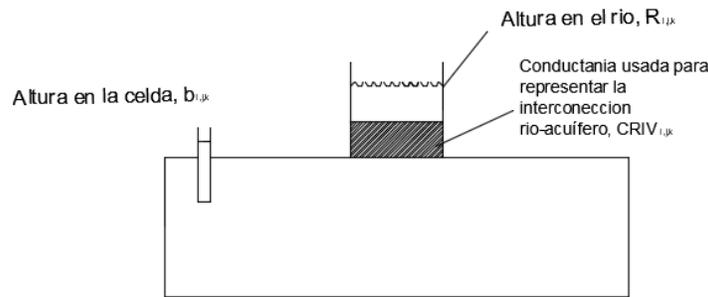


Figura 4. Representación conceptual de las aportaciones a través del lecho del río hacia una celda. Modificado de Harbaugh (2005).

Por ejemplo, en la situación esquemática mostrada en la figura 4,  $CRIV$  se daría como el producto de la conductividad hidráulica vertical del material del lecho del río y la zona del cauce al cruzar la celda, dividida por el espesor del cauce Ecuación [22].

$$a_{i,j,k,2} = CRIV_{i,j,k}(R_{i,j,k} - h_{i,j,k}) \quad [21]$$

Donde:

$R_{i,j,k}$ : Es la altura en el río (L).

$CRIV_{i,j,k}$ : Es una conductancia ( $L^2T^{-1}$ ) controlando el flujo proveniente del río hacia la celda  $i,j,k$ .

Esta ecuación puede ser reescrita de la siguiente manera Ecuación [22]:

$$a_{i,j,k,2} = -CRIV_{i,j,k}h_{i,j,k} + CRIV_{i,j,k}R_{i,j,k} \quad [22]$$





En general, si hay N fuentes externas o tensiones que afectan a una sola celda, el flujo combinado es expresado por la ecuación [23].

$$\sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N (P_{i,j,k} h_{i,j,k}) + \sum_{n=1}^N (q_{i,j,k,n}) \quad [23]$$

Definiendo  $P_{i,j,k}$  y  $Q_{i,j,k}$  como expresiones:

$$P_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N P_{i,j,k,n}$$

Y

$$Q_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n}$$

La Ecuación [24] Representa el termino general del flujo externo para la celda i,j,k.

$$\sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \quad [24]$$

Aplicando la ecuación de continuidad a la celda i,j,k, tomando en cuenta los flujos provenientes de las seis caras de las celdas adyacentes, cambio de almacenamiento y el flujo externo, se obtiene la Ecuación [25].

$$\begin{aligned} q_{i,j-\frac{1}{2},k} + q_{i,j+\frac{1}{2},k} + q_{i-\frac{1}{2},i,k} + q_{i+\frac{1}{2},i,k} + q_{i,j,k-\frac{1}{2}} + q_{i,j,k+\frac{1}{2}} + P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \\ = SS_{i,j,k} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \quad [25] \end{aligned}$$

Donde:

$\Delta h_{i,j,k}/\Delta t$ : Es una diferencia finita aproximada para la derivada de la altura respecto del tiempo ( $LT^{-1}$ ).

$SS_{i,j,k}$ : Representa el almacenamiento específico de la celda i,j,k ( $L^{-1}$ ).

$\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$ : Es el volumen de la celda i,j,k ( $L^3$ ).





Dando una diferencia finita aproximada para la celda i,j,k tenemos la Ecuación [26].

$$CR_{i,j-\frac{1}{2},k}(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k}(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) + CC_{i-\frac{1}{2},j,k}(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) +$$

$$CC_{i+\frac{1}{2},j,k}(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k-\frac{1}{2}}(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}}(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) +$$

$$P_{i,j,k}h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k}(\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \quad [26]$$

MODFLOW incorpora varias soluciones diferentes para la solución iterativa del conjunto de ecuaciones de diferencia finita, y se organiza de modo que los esquemas alternativos de la solución se puedan agregar sin la interrupción del programa. Además, la complejidad se puede reducir asumiendo que el superíndice de tiempo es m. a menos que se indique lo contrario resulta la Ecuación [27].

$$CV_{i,j,k-\frac{1}{2}}h_{i,j-1,k} + CC_{i-\frac{1}{2},j,k}h_{i-1,j,k} + CR_{i,j-\frac{1}{2},k}h_{i,j-1,k}$$

$$+ \left( - CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} - CC_{i-\frac{1}{2},j,k} - CR_{i,j-\frac{1}{2},k} - CR_{i,j+\frac{1}{2},k} - CC_{i+\frac{1}{2},j,k} - CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} \right.$$

$$\left. + HCOF_{i,j,k} \right) h_{i,j,k} + CR_{i,j+\frac{1}{2},k}h_{i,j,k} + CC_{i+\frac{1}{2},j,k}h_{i,j,k} + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}}h_{i,j,k}$$

$$= RHS_{i,j,k} \quad [27]$$

Donde:

$$HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - \frac{SS_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k}{t - t^{m-1}} (L^2 T^{-1}).$$

$$RHS_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} - SS_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \frac{h_{i,j,k}^{m-1}}{t - t^{m-1}} (L^3 T^{-1}).$$

Todo el sistema de ecuaciones de la Ecuación [27] que incluye una ecuación para cada variable de la altura de la celda, puede escribirse en forma de matriz como en la Ecuación [28].

$$[A]\{h\} = \{q\} \quad [28]$$

Donde:

[A]: Es la matriz del coeficiente de altura del lado izquierdo de la ecuación [27] para todos los nodos activos de la malla.





{h}: Es un vector de los valores de alturas en el final del paso de tiempo  $m$  para todos los nodos de la malla.

{q}: Es un vector de los términos constantes, RHS, para todos los nodos de la malla.

MODFLOW ensambla el vector {q} y los términos que componen a [A] a través de una serie de subrutinas. El vector {q} y los términos que comprenden [A] se transfieren a subrutinas que realmente resuelven las ecuaciones de la matriz para el vector {h}.

Cuando se está usando el modelo, formular una ecuación de la forma de la Ecuación [27] para cada una de las celdas dentro de la malla del modelo, generalmente es innecesario, porque el estatus se especifica con anterioridad para poder simular las condiciones de contorno.

En MODFLOW, las celdas para poder simular las condiciones de contorno utilizan dos grupos de categorías: celdas de alturas constantes y celdas inactivas, las celdas restantes del modelo se clasifican como celdas de altura variable.

Las celdas inactivas y las de nivel constante son usadas en MODFLOW para representar las condiciones a lo largo de varios límites hidrológicos de la malla. Por ejemplo, en la Figura 5 se muestra el mapa los límites de un acuífero superpuestos a una cuadrícula de celdas generadas para el modelo. El acuífero es de forma irregular mientras que el modelo siempre es de forma rectangular, En las zonas donde el acuífero coincide con el borde exterior de la cuadrícula, no se necesita una designación especial para indicar que no hay flujo porque MODFLOW no calcula el flujo de las celdas a través de los bordes exteriores de la malla, incluyendo la parte superior e inferior.



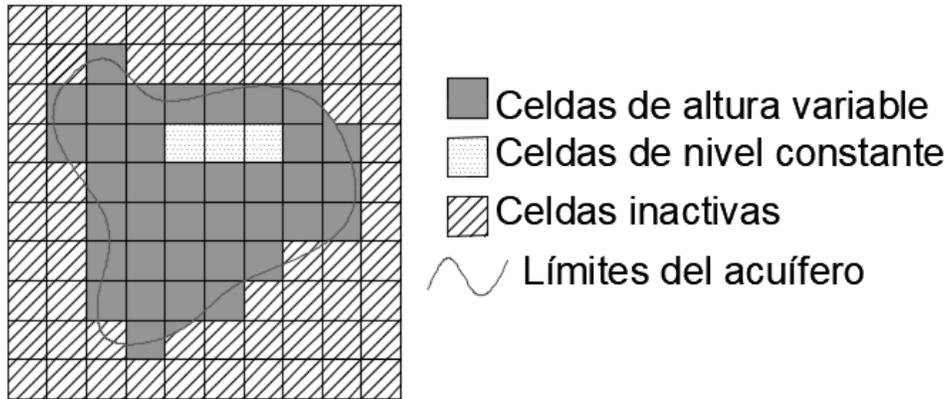


Figura 5. Discretización del acuífero mostrando las designaciones de las celdas y las condiciones de contorno. (Modificado de McDonald y Harbauhg, 2005).

Dentro de la malla las celdas sin flujo se han utilizado para eliminar la parte de la malla más allá de los límites del acuífero. Las celdas de nivel constante pueden ser utilizadas para representar el contacto directo del acuífero con aguas superficiales importantes.

MODFLOW maneja la discretización del espacio en la dirección horizontal leyendo el número de filas, y el ancho de cada fila y columna (es decir la anchura de las celdas en la dirección transversal a la fila o columna).

La discretización del espacio en la dirección vertical se maneja en el modelo especificando el número de capas a utilizar, y especificando las elevaciones superior e inferior de cada celda en cada capa.

La discretización vertical se puede visualizar simplemente como una extensión de la discretización uni-areal proceso más o menos arbitrario de dividir el sistema de flujo en segmentos en la dimensión vertical, regido en arte por la solución vertical deseada en los resultados.

La Figura 6 (A) Muestra una secuencia geohidrológica típica que ha sido discretizada de acuerdo a las figuras (B) y (C) de acuerdo a varias interpretaciones.



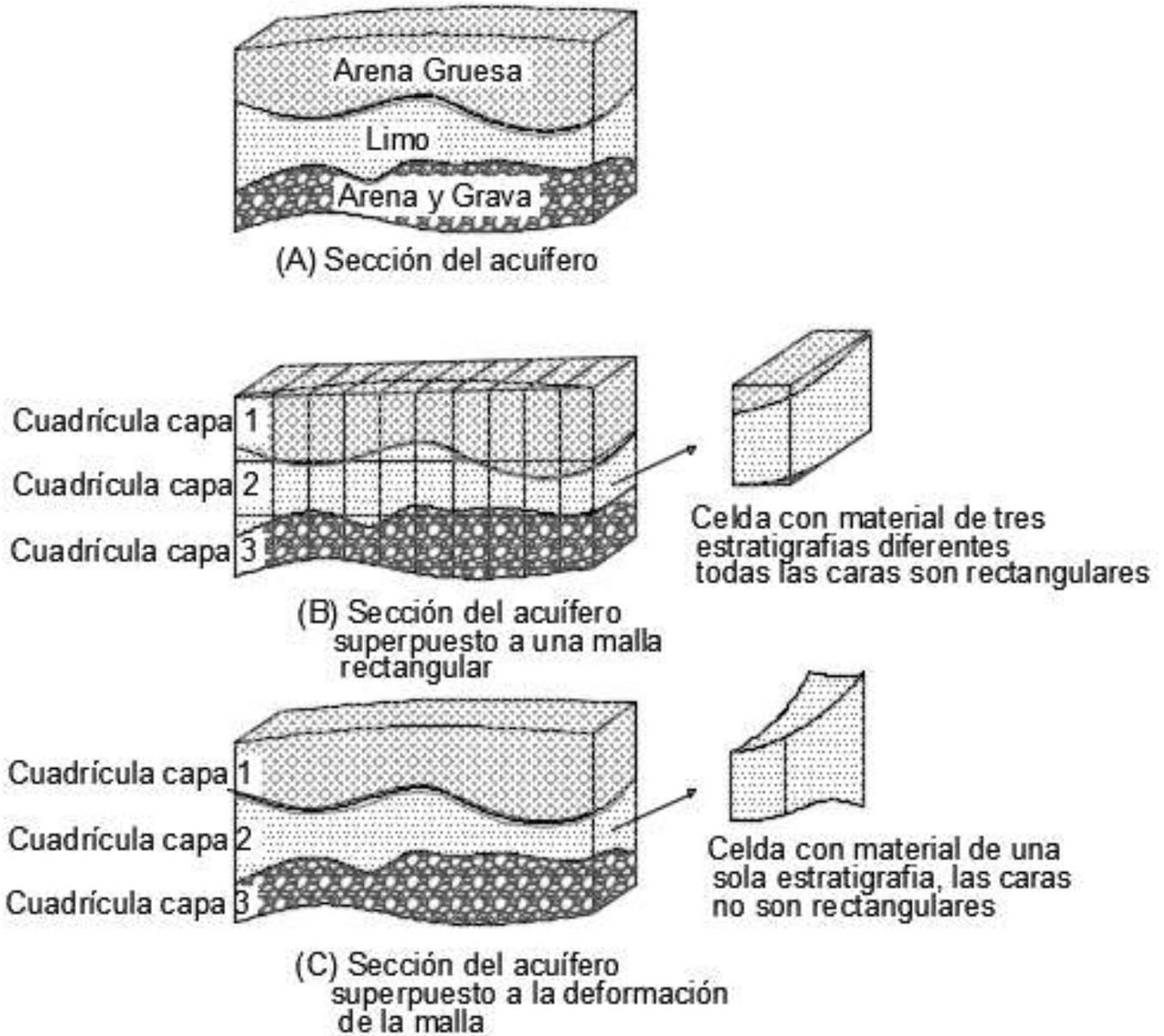


Figura 6. Esquema de discretización vertical (de McDonald y Habaugh, 2005)





## BASES DE DATOS

Para la realización de este proyecto es necesario la recopilación de información meteorológica, geológica y de recursos naturales, por lo que es necesario consultar las bases de datos públicas, siempre tratando de obtener la información con la mejor calidad posible.

### *MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES*

El INEGI es una institución pública autónoma encargada de regular y coordinar el sistema nacional de información estadística y geográfica, así como de recolectar y difundir información sobre el territorio, los recursos, la población y la economía de México, con el fin de proveer las características de nuestro país y región. Lo cual nos pueda ayudar en la toma de decisiones (INEGI, 2021).

México para hacer la representación de la superficie terrestre, cuenta con el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) el cual es un producto que expresa la elevación del territorio continental mexicano mediante el valor de un punto en la superficie terrestre. Su ubicación geográfica está definida por las coordenadas (X, Y) incluyendo la elevación representativa (Z). Estos puntos se distribuyen de forma regular en todo el territorio (INEGI, febrero 2021).

Con estas cartas obtenemos la ubicación espacial de nuestra zona de estudio además de la topografía presente.

### *CONABIO*

La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) es una comisión intersecretarial, la cual fue creada en 1992 con carácter de permanente (CONABIO, 2021).

“La CONABIO tiene la misión de promover, coordinar, apoyar y realizar actividades dirigidas al conocimiento de la diversidad biológica, así como a su conservación y uso sustentable para beneficio de la sociedad. Fue concebida como una





organización de investigación aplicada, promotora de investigación básica, que compila y genera información sobre biodiversidad, desarrolla capacidades humanas en el área de informática de la biodiversidad y es fuente pública de información y conocimiento accesible para toda la sociedad” (CONABIO, 2021).

“Entre las funciones principales de la CONABIO están instrumentar y operar el Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB), como establece el artículo 80, fracción V, de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, para brindar datos, información y asesoría a diversos usuarios, así como instrumentar las redes de información nacionales y mundiales sobre biodiversidad; dar cumplimiento a aquellos compromisos internacionales en materia de biodiversidad adquiridos por México que le sean asignados, y llevar a cabo acciones orientadas a la conservación y uso sustentable de la biodiversidad de México” (CONABIO, 2021).

### *BASE DE DATOS CLIMATOLÓGICA NACIONAL (SISTEMA 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, 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, 2021).

“CLICOM Estaciones permite hacer gráficas (ciclo anual y series de tiempo, temperaturas, precipitación, evaporación) y descargarlas, la interface de visualización de las gráficas se hace seleccionando primero un estado del país y luego una estación climática directamente del mapa, o bien se hace una búsqueda de una estación por su nombre. También se pueden seleccionar las estaciones con más y menos de 25 años de datos” (CICESE, 2021).





## 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” (CONAGUA, 2012).

En este registro podemos encontrar las concesiones de agua para cada acuífero, estas concesiones están divididas en los diferentes usos consuntivos y aportan información de ubicación, volumen extraído, nombre del titular y el destino que se le da al agua.

## METODOLOGÍA

### CICLO HIDROLÓGICO

Antes de plantear una metodología es necesario conocer el ciclo hidrológico, ya que este es la base de cualquier estudio o proyecto referente al área de la Hidrología.

A este ciclo se le conoce como el proceso por el cual el agua se encuentra en distintas partes de la hidrosfera, pasando por los diferentes estados de la materia.

El ciclo del agua consta de varios procesos los cuales son:

**Evaporación:** En este proceso el agua pasa de estado líquido a gaseoso debido a los rayos solares los cuales elevan la temperatura de los lagos, ríos y mares estos generando el mayor porcentaje de volumen evaporado, otra tanto viene a través de las plantas por medio de la transpiración.

**Condensación:** Una vez que el agua se evapora pasa al siguiente estado que es gaseoso, el agua comienza a ascender a grandes alturas aglomerándose en lo que conocemos como nubes.





Precipitación: Las gotas de agua que conforman las nubes se comienzan a combinar entre ellas aumentando su volumen y peso, lo que genera que comiencen a caer en forma de lluvia, dependiendo de la temperatura esta también puede caer en forma de nieve o granizo (hielo).

Infiltración: Es el agua que ingresa al suelo transformándose en agua subterránea.

Escorrentías: Es el agua que circula por la superficie terrestre en forma de ríos o arroyos.

Este ciclo se representa en la Figura 7.

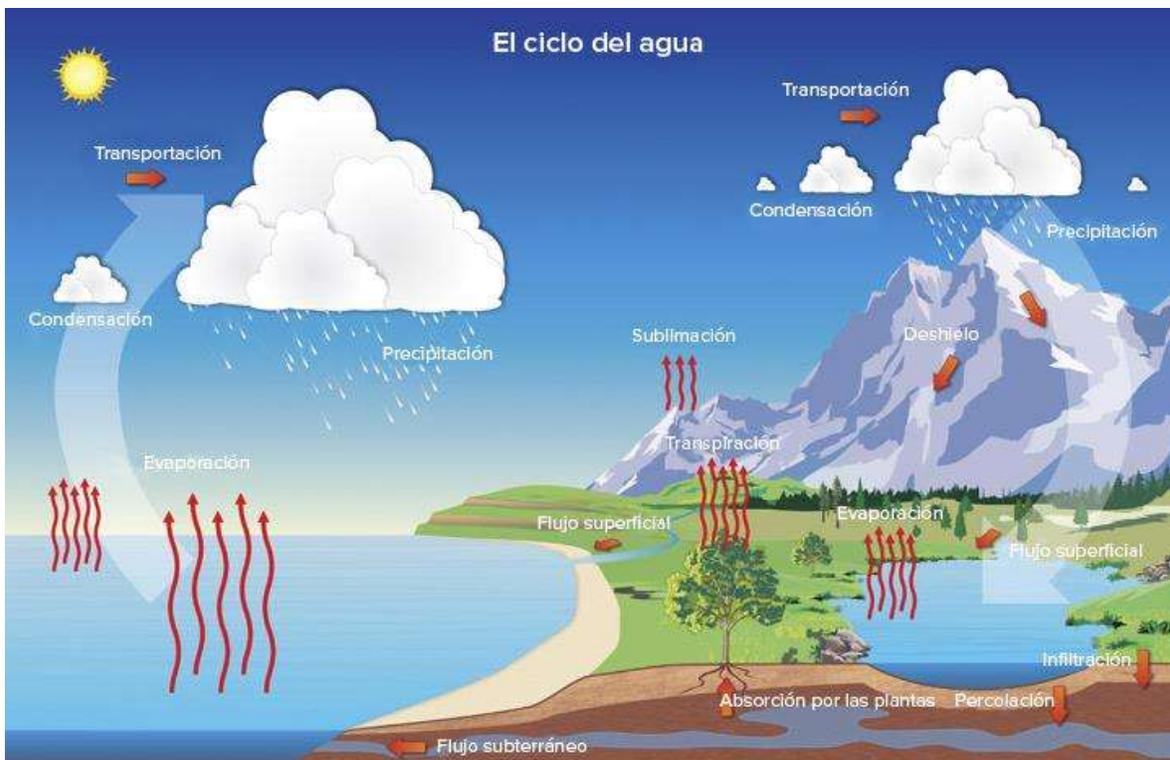


Figura 7 Representación del ciclo hidrológico. Crédito de imagen: [El ciclo del agua](#) de NOAA National Weather Service Jetstream, [CC BY 2.0](#)





Para la realización de esta investigación se propuso dividir el proyecto en 4 principales apartados, mostrados en la Figura 8.

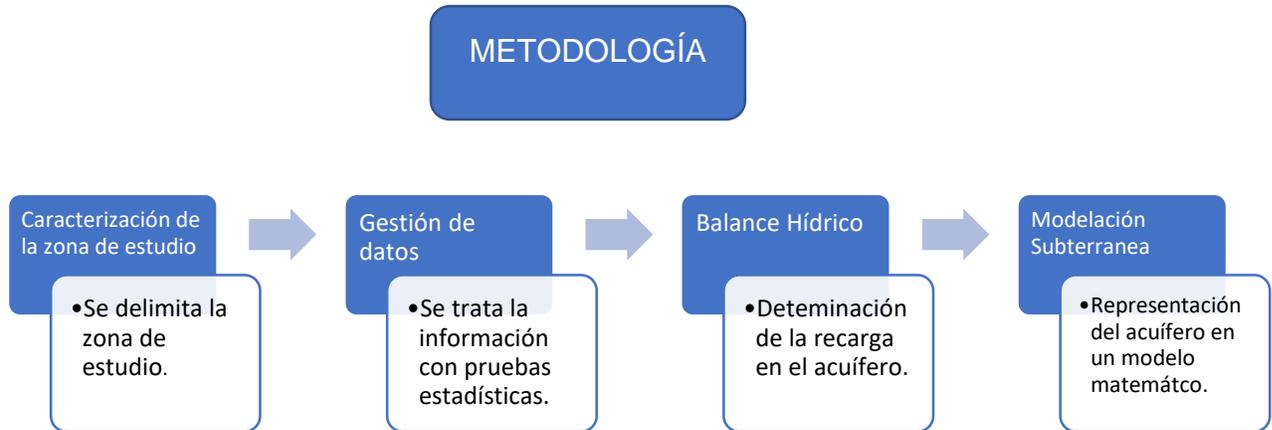


Figura 8, Metodología propuesta para la modelación del acuífero.

### CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En esta etapa se delimita la zona de estudio utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG) en el cual se importa el mapa nacional de acuíferos y seleccionamos el que nos corresponda, de aquí podemos obtener toda la información espacial de la zona como puede ser; A qué estado de la república corresponde, que municipios son los que se abastecen del acuífero, el sistema de corrientes con el que cuenta la zona, la sinuosidad del terreno, a que región y subregión hidrológica corresponde además de su colindancia con otros acuíferos adyacentes., También en esta parte se selecciona los archivos shp con los que obtendremos información sobre el uso y tipo de suelo además de la geología de la zona.





## GESTIÓN DE DATOS

En este apartado se seleccionan las estaciones meteorológicas tomando en cuenta diferentes criterios según nos convengan, estos criterios pueden ser; Años efectivos (número de años de información con los que cuenta la estación sin importar que sean consecutivos), Años en servicio (tiempo en el que la estación ha estado trabajando), porcentaje de vacíos (cuantos años pueden faltar en las series de precipitación) por lo regular se recomienda que mínimo se cuente con un total de 25 años efectivos.

Las estas estaciones son obtenidas median un shp en el cual vienen distribuidas mediante sus coordenadas de longitud, latitud y elevación.

De estas estaciones es de donde se obtienen las series de precipitaciones y temperaturas ocurridas en un rango de tiempo.

### *POLÍGONOS DE THIESSEN*

Los Polígonos de Thiessen son un método por el cual se determina el área de influencia de las estaciones meteorológicas sobre el área de estudio, en este caso sobre el acuífero, este método consiste en trazar rectas justo en el centro de la distancia entre dos estaciones, una vez trazadas estas divisiones, se deben extender las rectas hasta que se intersecten entre sí, formando polígonos los cuales representan el área de influencia sobre el acuífero, ya que se tienen los polígonos podemos ver cuales estaciones son las que nos pueden servir para nuestro estudio, ya que habrá algunas que no estén tan cerca de la zona de estudio por lo que no tendrán área de influencia sobre la misma por lo que sería innecesario trabajar con ellas.

### *PRUEBAS ESTADÍSTICAS*

Estas pruebas son necesarias ya que debemos de corroborar que las series de precipitación con las que vamos a trabajar corresponden a series de precipitación





por lo que se debe de cumplir que sean homogéneas, independientes y sin tendencia.

La homogeneidad en las series de precipitación nos quiere decir que la información si corresponde a una misma población.

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.

La tendencia ocurre cuando las series de precipitación tienen un comportamiento ascendente, descendente o algún salto (que años atrás tenga precipitaciones mayores y después de algún año estos valores sean menores o viceversa, lo que generaría un escalón en las series de precipitación) por lo que se podría decir que los valores de precipitación están siendo afectados por alguna razón, esto puede ocurrir cuando la serie no es homogénea o es dependiente., Para que se tenga una serie sin tendencia los valores de precipitaciones deben de ser aleatorios.

Todo este proceso de selección de estaciones se describió en el apartado de GESTAD el cual realiza distintas pruebas estadísticas, La Figura 9 describe el nombre de la prueba estadística y que es lo que determina.



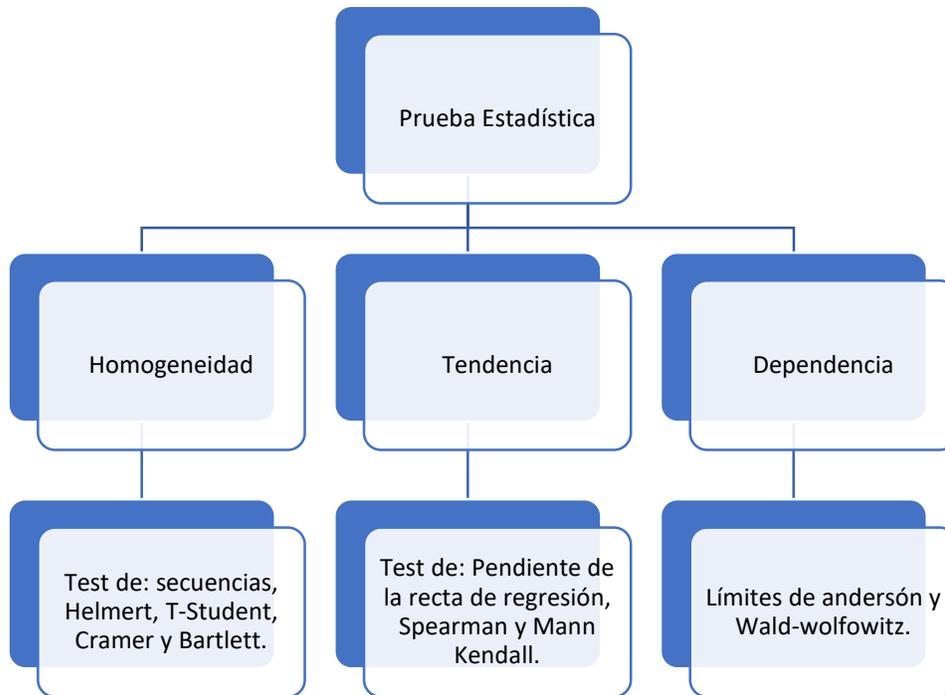


Figura 9. Pruebas estadísticas utilizadas en las series de precipitación.

## BALANCE HÍDRICO

Esta norma establece un método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales y del subsuelo, para la explotación y el aprovechamiento de las mismas (CONAGUA, 2015).

Para realizar este balance se requiere hacer uso del método indirecto también conocido como Precipitación-Escorrimento, ya que no se contaba con información hidrométrica de la zona., Este método consiste en determinar el volumen de escurrimiento anual por medio de la Ecuación [29]

$$Pe = Pa * Ce \quad [29]$$

Donde:

Pe = Precipitación media anual de escurrimiento    Ce = Coeficiente de escurrimiento

Pa = Precipitación media anual en mm





En la cual la información de la precipitación deberá contar mínimo con 20 años de información consecutivos.

### COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO

Este coeficiente puede ser determinado por medio del uso y tipo de suelo y la precipitación de la zona.

Debido a la falta de información se hace uso de los servicios del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y de visitas de campo, se clasifican los suelos de la cuenca en estudio, en tres diferentes tipos: A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables), y C (suelos casi impermeables), que se especifican en el (Anexo 1) y al tomar en cuenta el uso actual del suelo, se obtiene el valor del parámetro K (CONAGUA, 2015).

“Si en la cuenca en estudio existen diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas y obtener el promedio ponderado de todas ellas” (CONAGUA,2015).

Ya que se tiene el valor de K, el coeficiente de escurrimiento anual ( $C_e$ ), se calcula mediante las Ecuaciones [30] y [31].

$$C_e = \frac{K(Pa - 250)}{200} \quad [30] \text{ Sólo si } K \text{ resulta menor o igual que } 0.15.$$

$$C_e = \frac{K(Pa - 250)}{200} + \frac{(K - 0.15)}{1.5} \quad [31] \text{ Sólo si } K \text{ es mayor que } 0.15.$$

Estas fórmulas sólo tienen validez cuando la precipitación media anual de la zona se encuentra entre el rango de los 350 y 2150 mm.

Una vez calculado el coeficiente de escurrimiento ( $C_e$ ) se hace uso de la ecuación [29] para así determinar la precipitación que escurre de la zona.





*DETERMINACIÓN DE LA EVTR POR EL MÉTODO DE THORNTWAITE*

Este es un método desarrollado en 1944 el cual calcula el uso consuntivo mensual en función de las temperaturas medias mensuales de la zona en estudio mediante el uso de la Ecuación [32].

$$U_j = 1.6K_a \left(\frac{10T_j}{I}\right)^a \quad [32]$$

$U_j$  = Uso consuntivo (Evapotranspiración) en el mes  $j$ , en cm.

$U_j$  = EVTP (Evapotranspiración potencial).

$T_j$  = Temperatura media en el mes  $j$ , en °C.

$a, I$  = Constantes.

$K_a$  = Constantes que dependen de la latitud y el mes del año (Tabla 2).

La constante “ $I$ ” que representa el Índice de eficiencia se calcula de la siguiente Ecuación [33]:

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad [33]$$

Donde  $i_j$  está determinada por la ecuación [34]:

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5}\right)^{1.514} \quad [34]$$

$j$  = Número de mes.





Tabla 2. Valores de Ka dependiendo del mes y la ubicación en grados.

Longitud 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	0.9	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

La constante “a” se determina con la Ecuación [35]:

$$a = 675x10^{-9}I^3 - 771x10^{-7}I^2 + 179x10^{-4}I + 0.492 \quad [35]$$

Teniendo todos los datos requeridos se hace uso de la ecuación [32] para determinar la evapotranspiración potencial (EVTP) de la zona.

Para determinar la evapotranspiración real en mm (EVTR) se debe contar con la precipitación total mensual en mm (Ptm) la cual vamos a comparar con la EVTP en mm, si la EVTP es mayor que la Ptm se tomará como EVTR a la Ptm, en caso contrario en el cual la EVTP sea menor a la Ptm, la EVTP pasará a ser la EVTR.

Este proceso se debe realizar para cada una de las estaciones seleccionadas como estaciones principales.





## MODELACIÓN SUBTERRÁNEA

Dentro de este apartado se conceptualiza el modelo subterráneo, el cual se va a idealizar por medio de un mallado que definirá las dimensiones con las que estaremos trabajando nuestro acuífero. El software que se utilizó para esta conceptualización fue Processing MODFLOW.

MODFLOW, al ser un software de modelación con elementos finitos, requiere una serie de mallas para poder representar el modelo subterráneo, las cuales se muestran en la Figura 10.

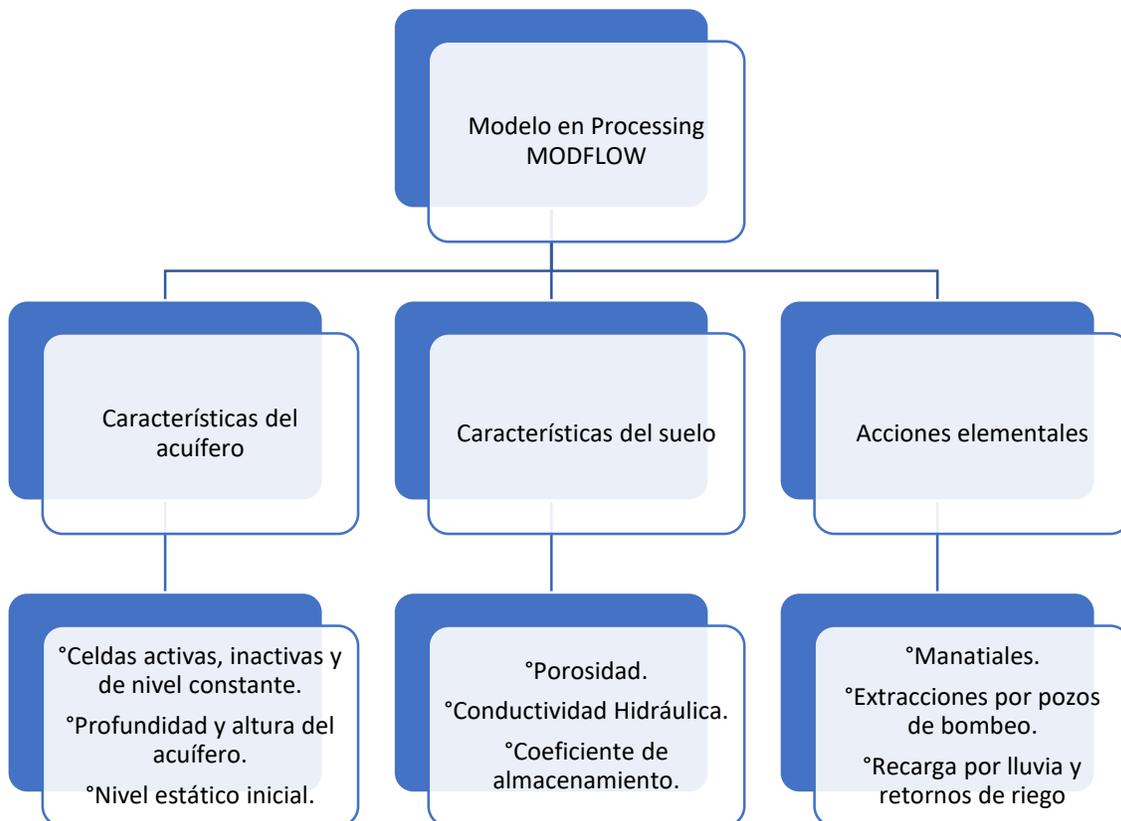


Figura 10. Paquetes en forma de malla con los que se conceptualiza el modelo en MODFLOW.

## CARACTERÍSTICAS DEL ACUÍFERO

En esta parte se definen las celdas que estarán activas (en donde se aplicaran las ecuaciones para el flujo subterráneo), las celdas inactivas (no se aplicaran las ecuaciones), y las de nivel constante (representan grandes cuerpos de agua como





presas, lagos o ríos en el caso de que estos tenga relación con el acuífero)., 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*

Este paquete representa las condiciones del suelo, las cuales definirán el movimiento del agua subterránea a través del medio poroso., Para poder definir estas mallas se hace uso de mapas e información geológica y litológica proporcionada por (CONABIO, 2021).

Con estos mapas se dividen las principales unidades geológicas que se encuentran en el acuífero y en base a eso se proponen distintos rangos de valores para las propiedades del suelo como son la conductividad hidráulica y la porosidad.

### *ACCIONES ELEMENTALES*

Estas acciones son por las que estará sometido el modelo, Representan las entradas y salidas de agua del acuífero.

Las extracciones por pozos de bombeo al igual que el aprovechamiento de manantiales son obtenidas por medio de las concesiones que se encuentran en (REPDA, CONAGUA 2020). Las concesiones vienen con el nombre del titular además del volumen concesionado anualmente., para ubicarlas espacialmente cuentan con sus coordenadas en el sistema WGS.

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 explicado en los capítulos anteriores, a esta recarga por lluvia se le añade un porcentaje debido a la presencia de los distritos de riego, este retorno varía entre el 10 y 20% del volumen total concesionado para el aprovechamiento agrícola en dicho distrito.





## CALIBRACIÓN

La calibración en los modelos es tratar de encontrar los valores óptimos con los cuales se puedan representar un modelo apegado a la realidad, todo esto dependerá de que tan precisos son los resultados simulado con los observados, para esto se tienen diferentes métodos por los cuales se evalúan estos valores, en esta investigación se usaron los siguientes:

- EFICIENCIA DE NASH – SUTCLIFF (NSE).
- EFICIENCIA DE NASH – SUTCLIFF MODIFICADA (LN NSE).
- COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON (r).
- COEFICIENTE DE SIMETRÍA (CS).

### EFICIENCIA DE NASH – SUTCLIFF (NSE).

“Es un error cuadrático medio que da mayor peso a los errores grandes, que a menudo, pero no siempre, suceden durante periodos de flujo elevado. El valor de NSE varía de -1 a 1. Un valor de NSE = 1 significa que el ajuste es perfecto. Un valor de NSE = 0 significa que el error es del mismo orden de magnitud que la varianza de los datos observados, por lo que la media de estos datos 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” (Navarro, 2019) Ecuación [36].

$$NSE = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t))^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs}(t) - Q_{obs}(t))^2} [36]$$

### EFICIENCIA DE NASH – SUTCLIFF MODIFICADA (LN NSE).

Este coeficiente da mayor peso a los valores de flujos escasos, este coeficiente trabaja a base de logaritmos con el fin de reducir la sensibilidad generada por los valores extremos, con esto los valores grandes disminuyen y los que son bajos no son afectados tanto Ecuación [37].





$$\ln NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [(\ln Q_{sim}(t)) - \ln(Q_{obs}(t))]^2}{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{obs}(t)) - \ln(Q_{obs}(t))]^2} \quad [37]$$

COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON (r).

Esta prueba mide la covariabilidad de valores observados y simulados sin penalización por el sesgo. El valor del coeficiente varía entre -1 y 1. El coeficiente r toma el valor de 1, momento denominado de correlación completa positiva, cuando los puntos de datos describen una perfecta línea recta con pendiente positiva, con X e Y aumentando conjuntamente. Cuando los valores tienen una pendiente negativa el valor de r es -1, cuando el valor este cercano a cero quiere decir que no hay correlación entre las series Ecuación [38].

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(Q_{sim}(t) - mediaQ_{sim}) * (Q_{obs}(t) - mediaQ_{obs})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [(Q_{sim}(t) - mediaQ_{sim})^2] ** \sum_{i=1}^N [(Q_{obs}(t) - mediaQ_{obs})^2]}} \quad [38]$$

COEFICIENTE DE SIMETRÍA (CS)

Esta es una prueba sencilla donde se observa la simetría que hay entre la media simulada y la observada Ecuación [39].

$$CS = 1 \left[ \max \left( \frac{mediaQ_{sim}}{mediaQ_{obs}}; \frac{mediaQ_{obs}}{mediaQ_{sim}} \right) - 1 \right]^2 \quad [39]$$

Tabla 3. Calidad de ajuste

CALIDAD	Coeficientes
Muy Buena	$0.75 < Coeficiente \leq 1$
Buena	$0.65 < Coeficiente \leq 0.75$
Satisfactoria	$0.50 < Coeficiente \leq 0.65$
No satisfactoria	$Coeficiente \leq 0.50$

En la tabla 3 se muestran los indicadores de ajuste para la calibración.





## RESULTADOS

### ZONA DE ESTUDIO UBICACIÓN POLÍTICA

El acuífero que se analizó en este estudio es el acuífero con clave 1602 Morelia-Queréndaro, se encuentra ubicado en México, al noreste del estado de Michoacán el cual cuenta con una extensión de aproximadamente 3534 km<sup>2</sup> Figura 11.

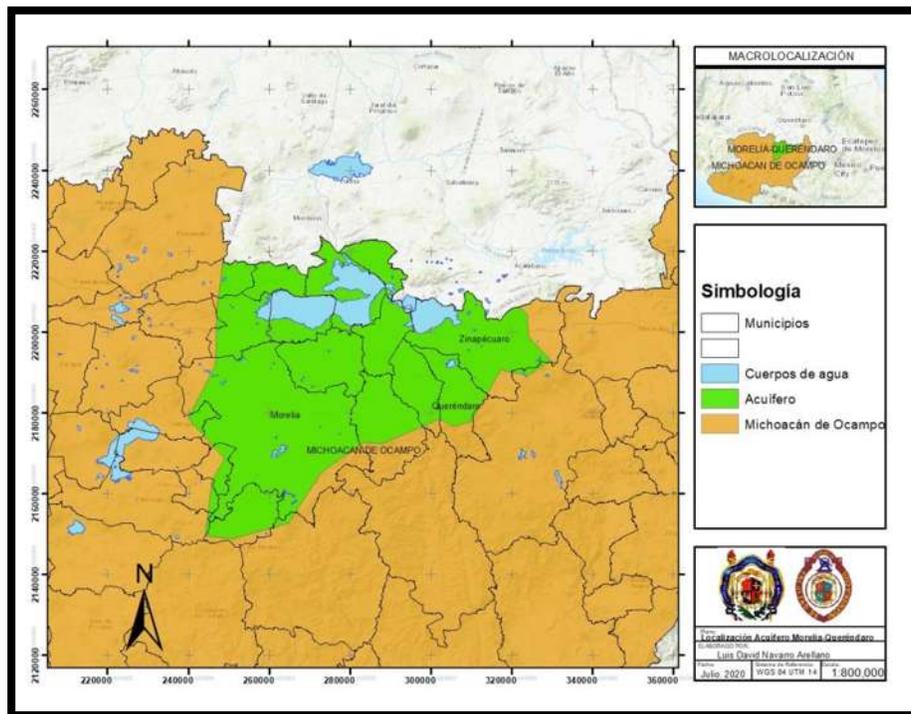


Figura 11. Ubicación política del acuífero 1602 Morelia-Queréndaro.

Los principales municipios que se encuentran en el acuífero son: Morelia, Zinapécuaro, Tarímbaro entre otros, en la Tabla 3 se muestran los municipios de los cuales se bastecen del acuífero Morelia-Queréndaro, definiendo su área dentro del acuífero y su porcentaje de influencia sobre el mismo.

Tabla 4 Municipios de Michoacán que se encuentra sobre el acuífero Morelia-Queréndaro.

Municipio	Área Km <sup>2</sup>	%
Acuitzio	149.3	4.2
Charo	199.3	5.6





Queréndaro	162.7	4.6
Morelia	1024.5	29.0
Indaparapeo	166.9	4.7
Tarímbaro	256.0	7.2
Zinapécuaro	446.4	12.6
Álvaro Obregón	159.2	4.5
Chucándiro	176.8	5.0
Copándaro	173.4	4.9
Huandacareo	95.4	2.7
Morelos	60.4	1.7
Cuitzeo	253.5	7.2
Santa Ana Maya	102.4	2.9

### DELIMITACIÓN HIDROLÓGICA

El acuífero Morelia-Queréndaro se encuentra en la región hidrológica Lerma Santiago Figura 12.

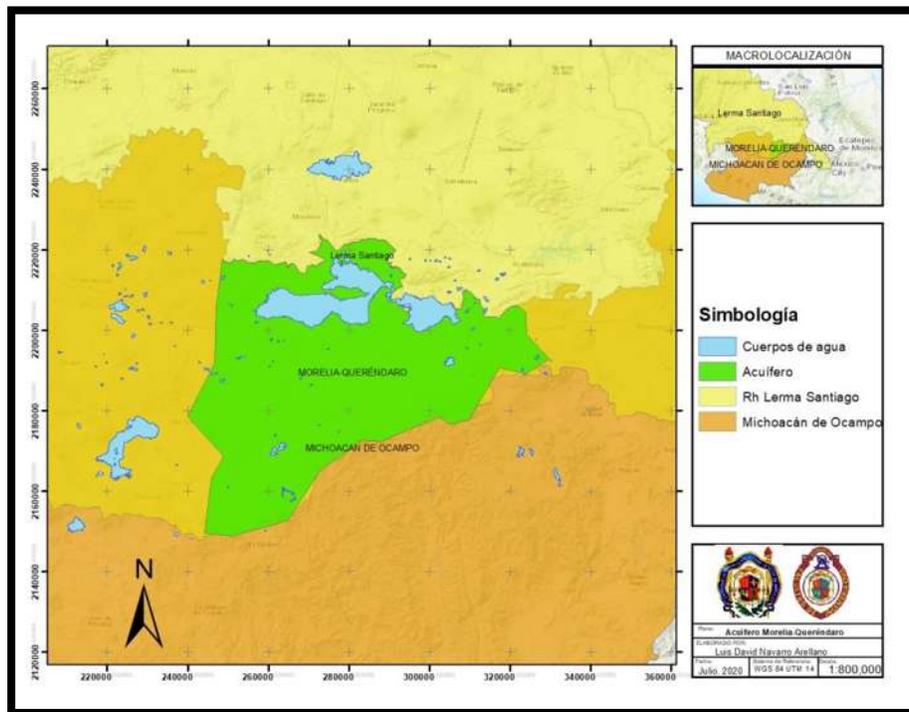


Figura 12. Ubicación Hidrológica del acuífero Morelia-Queréndaro, ubicado en la Región Hidrológica 12 Lerma Santiago.





Esta región se ubica en al centro y occidente de la República Mexicana, Principalmente es drenada por corrientes perenes (siempre llevan un flujo de agua durante el año), teniendo un escurrimiento en dirección suroeste-noreste. Esta región es una de las más importantes del país ya que es donde se encuentran ubicados los dos principales lagos de la republica que son el lago de Chapala y el lago de Cuitzeo.

Dicho acuífero también se encuentra en la Cuenca número 51 Lago de Pátzcuaro-Cuitzeo y Lago de Yuriria, Figura 13.

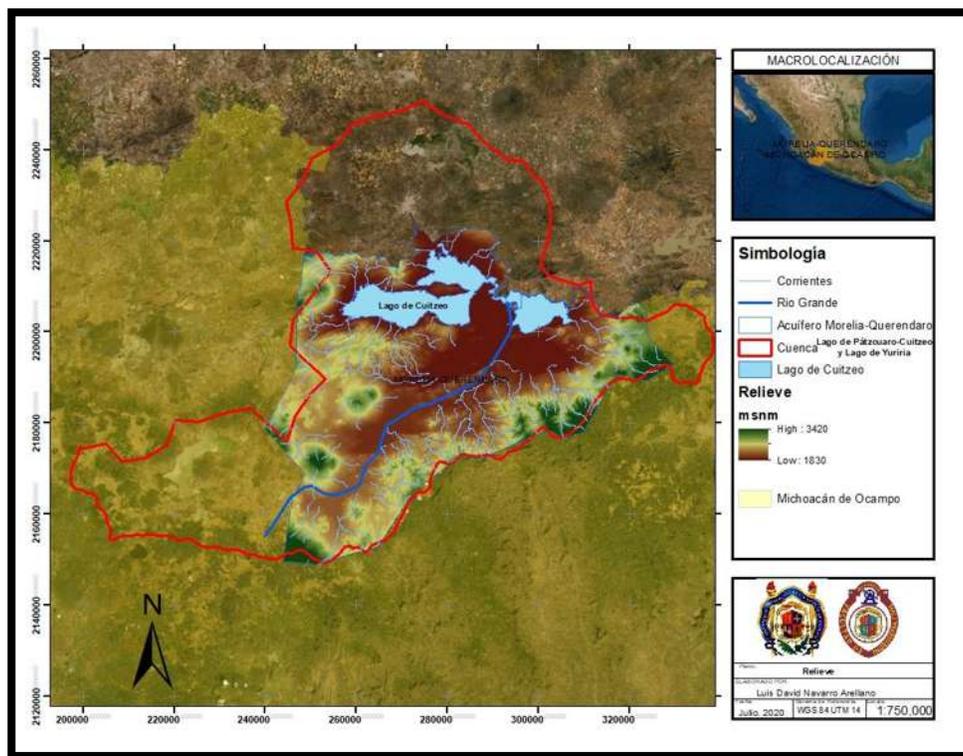


Figura 13. Ubicación Hidrológica del acuífero Morelia-Queréndaro Localizado en la cuenca 51 Lago de Pátzcuaro y Lago de Yuriria.

La mayoría de los 653 acuíferos con los que cuenta el territorio mexicano fueron divididos de manera política, es decir que no se dividieron respecto a sus características geológicas, sino que fueron delimitados de una forma que cada estado pudiera regular sus propias aguas, a su vez los estados dividieron los mismos entra varios municipios., En el caso del acuífero Morelia-Queréndaro esta división en la zona norte si fue considerada una división política ya que se colinda





con el estado de Guanajuato colindando con los acuíferos Ciénega Prieta-Moroleón y Lago de Cuitzeo., En la parte Sur, Este y Oeste el acuífero se delimito conforme al parteaguas de la cuenca 51 por lo que en esto si se tomó una consideración topográfica antes que política. El acuífero colinda en la parte sur con los acuíferos Tacámbaro-Turicato y Huetamo, al oeste con los acuíferos Pastor Ortiz-La Piedad, Lagunillas-Pátzcuaro y Zacapu por último en la parte este colinda con los acuíferos Ciudad Hidalgo-Tuxpan y Maravatio-Contepec-Hiptacio Huerta.

Este acuífero cuenta con un sistema de drenaje tipo dendrítico, constituido en su mayoría por corrientes intermitentes el cual proviene de los parteaguas de la cuenca los cuales tienen una elevación máxima aproximada de hasta los 3420 m.s.n.m. dichas corrientes abastecen al lago de Cuitzeo y a la corriente perene que atraviesa el acuífero, la cual es el Rio Grande, dicho rio recorre el interior de la ciudad de Morelia y es la principal zona de descarga de aguas residuales de la ciudad, este rio se dirige hacia el valle, donde descarga hacia el lago de Cuitzeo, el cual se ubica a una altura aproximada de 1830 m.s.n.m. Figura 14.

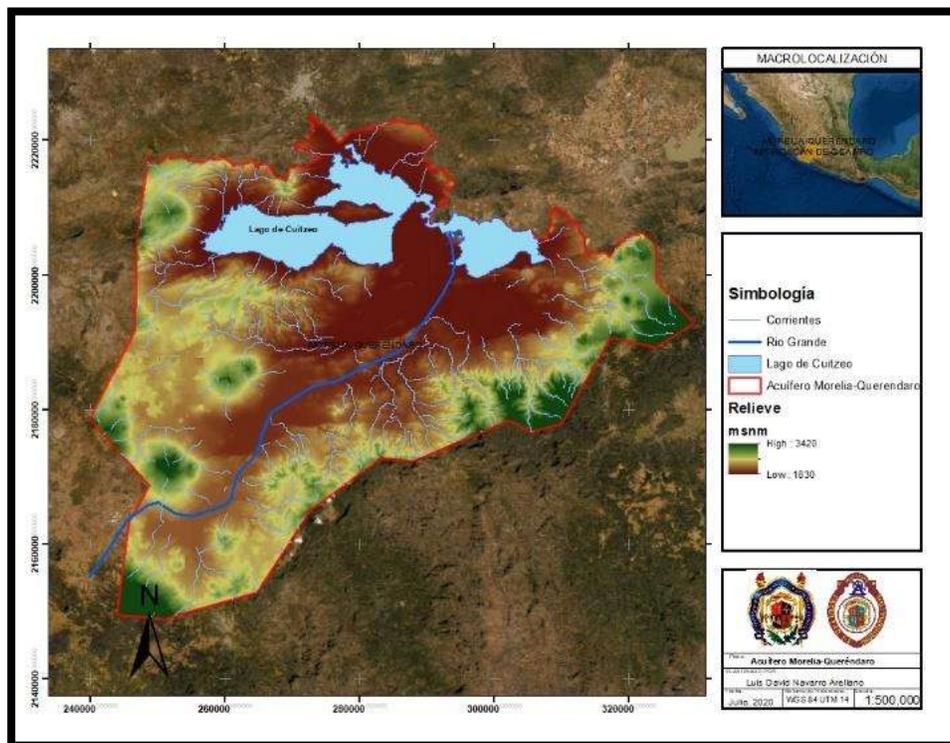


Figura 14. Sistema de corrientes del acuífero Morelia-Queréndaro.





Cabe mencionar que el acuífero se encuentra totalmente en veda regido por cuatro decretos, tres se encuentran en la parte noreste y noroeste los cuales son clasificados como tipo III y sólo permiten la extracción moderada para usos domésticos, industriales y de riego, el cuarto decreto se ubica en la parte del bajo balsas, este decreto clasifica como tipo II y sólo permite la extracción regulada para el uso doméstico.

### GESTIÓN DE LOS DATOS CLIMATOLÓGICOS

Los datos climatológicos se obtuvieron de la página de CLICOM (CICESE, 2020), de estas estaciones se obtuvieron lo que son las series de precipitaciones diarias y de temperaturas promedio diarias., Como se mencionó con anterioridad dichas series de datos deben de ser tratadas por distintas pruebas estadísticas y criterios del usuario.

### SELECCIÓN DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS

En primera instancia para poder elegir las estaciones meteorológicas se realizó un buffer alrededor del acuífero a una distancia de 50 km, todas las estaciones que estén dentro de este rango serán tomadas en cuenta para la elaboración del estudio.

En nuestro caso en un principio se tomaron en cuenta un total de 74 estaciones climatológicas, al hacer uso de distintas consideraciones y criterios como que las series contaran con un mínimo de 25 años de registros además de someterlas a una prueba rápida con el software GESTAD para saber la calidad de la información, con esto se pudo descartar un total de 43 estaciones, quedándonos así con un total de 31 estaciones con buena información climatológica Figura 15.



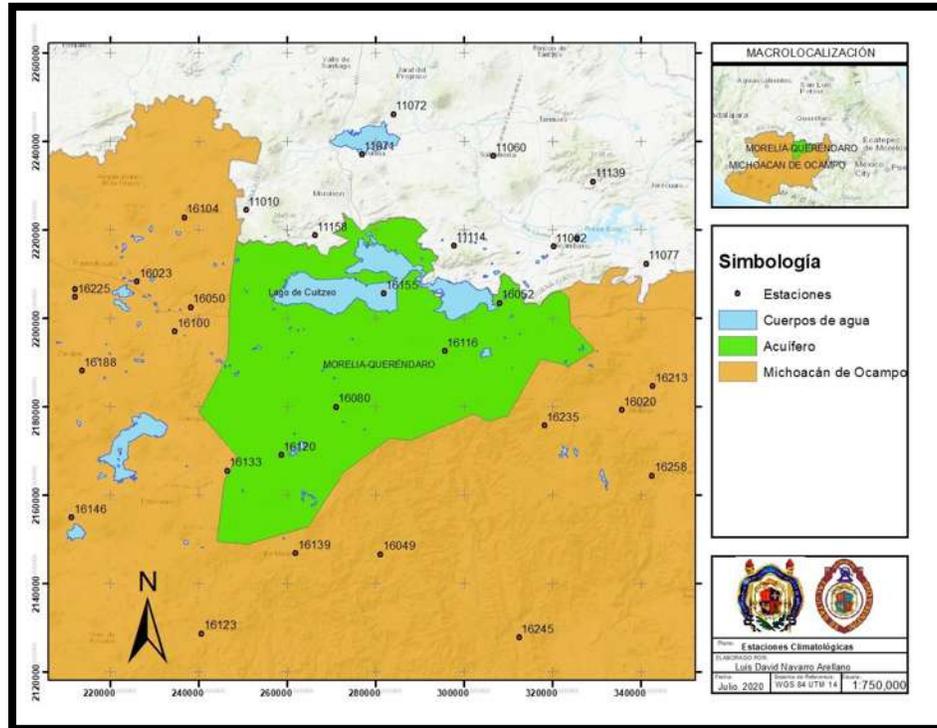


Figura 15. 31 estaciones con buena información climatológica.

## ESTACIONES PRINCIPALES

De estas 31 estaciones climatológicas (Anexo 2) se escogieron un total de 11 estaciones principales Figura 16, las estaciones principales fueron escogidas con una distribución estratégica para que pudieran cubrir toda la zona de estudio, la información faltante de las estaciones principales fue llenada por medio de regresión lineal simple, regresión lineal múltiple y por IDW Con ayuda del software GESTAD y con la información del conjunto de las 31 estaciones.

Con ayuda los polígonos de Thiessen se corroboró que las 11 estaciones principales lograran cubrir toda la zona de estudio, la información con la que cuentan es a partir del año 1985 y hasta el 2010.

En la Tabla 4 se muestra la información para la localización de las estaciones principales.



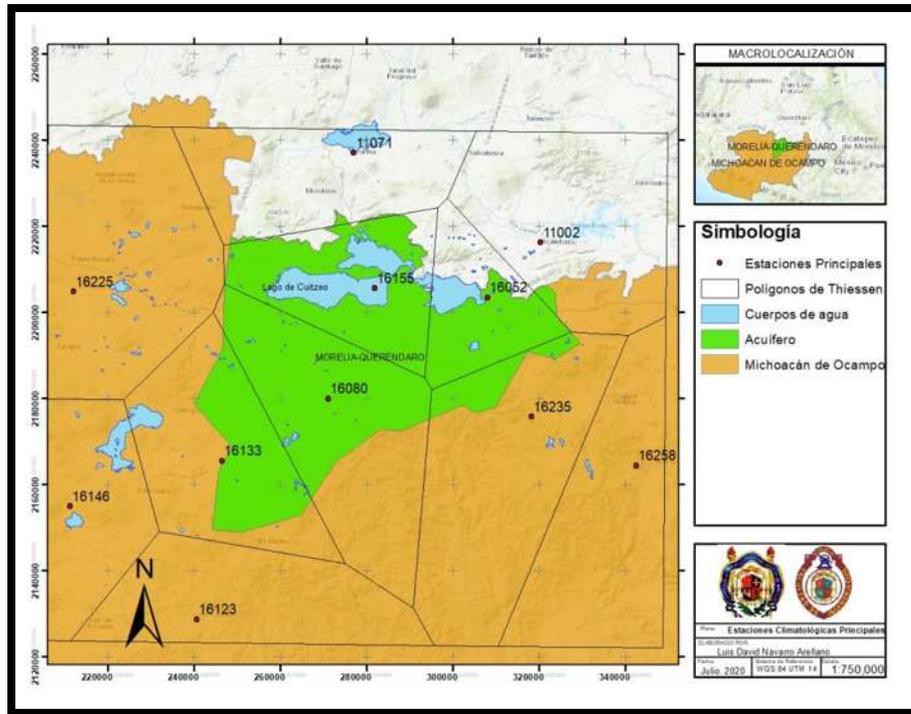


Figura 16. Estaciones climatológicas principales con información de 1985 y hasta el 2010.

Tabla 5. Información para la localización de las estaciones principales.

ID	NOMBRE	LONGITUD Grados	LATITUD Grados	ALTITUD m.s.n.m.
11071	SANTA MARIA YURIRIA(DGE)	-101° 8'	20° 8'	1761
11002	ACAMBARO, ACAMBARO	-100° 43'	20° 43'	1846
16155	COPANDARO, JIMENEZ	-101° 5'	19° 5'	1981
16052	HUINGO, ZINAPECUARO	-100° 50'	19° 50'	1832
16225	VILLA JIMENEZ, V.JIMENEZ	-101° 45'	19° 45'	1980
16080	MORELIA, MORELIA (SMN)	-101° 11'	19° 11'	1941
16235	HUAJUMBARO, CD. HIDALGO	-100° 44'	19° 44'	2285
16258	PRESA TUXPAN, TUXPAN	-100° 30'	19° 30'	1770
16133	TURICATO, TURICATO	-101° 25'	19° 25'	795
16146	ZIRAHUEN,VILLA ESCALANTE	-101° 45'	19° 45'	1850
16123	TACAMBARO, TACAMBARO	-101° 28'	19° 2'	1755





VALIDACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para la validación de las series de precipitaciones se utilizó el software GESTAD, el cual sometió a las 11 estaciones principales a distintas pruebas estadísticas de Homogeneidad, Tendencia e independencia obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 5.

Tabla 6. Resultados de las pruebas estadísticas realizados por el software GESTAD.

ID Estación	T-Student	Cramer	Bartlett	P. de regresión	Spearman	Mann Kendall	L. Anderson	Wald-wolfowitz
16052	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16123	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
11071	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16133	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16235	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16146	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
11002	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16080	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16155	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16225	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16258	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente

Como se puede apreciar en la Tabla 5, la mayoría de las estaciones cumplen con todas las pruebas a excepción de dos, las cuales son la estación 11002 y 16155 que no pasaron una prueba de homogeneidad, en esta parte es donde entra el criterio del hidrólogo y que tan rígidos vamos a ser con la información que vamos a usar, en este caso se optó por tomar un criterio moderado ya que se permitió que las estaciones puedan fallar máximo en una prueba de homogeneidad y no podían fallar en ninguna de las otras pruebas (Tendencia e Independencia) si alguna





estación fallaba dos o más pruebas de homogeneidad, alguna de independencia o tendencia, la estación sería descartada.

La razón principal por la que se tomaron estas decisiones y criterios es debido a que en México no se cuenta con tan buena información climatológica, por lo que si se es muy exigente con esta información, es muy posible que no te quede la suficiente para poder hacer un estudio de la mejor manera.

### SERIES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA

Una vez validada la información, se generaron las series de precipitaciones medias anuales, para ver el comportamiento de la lluvia que comúnmente ocurre en la zona, como se puede observar la media se encuentra entre el rango de los 630 a los 1170 mm/anuales Tabla 6.

Tabla 7. Precipitación media anual en el periodo de 1985-2010.

P(mm) media anual en el periodo 1985-2010													
ESTACIÓN	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	ANUAL
11002	11.15	8.40	7.59	6.33	41.68	117.02	176.97	184.32	130.99	45.76	11.51	4.62	746.33
11071	11.48	11.46	6.25	7.07	22.64	106.02	154.52	146.74	119.16	32.25	9.89	5.01	632.50
16052	19.00	9.45	6.30	8.49	31.82	134.37	197.39	194.62	134.65	49.30	10.47	5.25	801.09
16080	12.39	14.06	7.23	10.97	47.85	142.23	173.12	180.15	142.91	56.84	11.37	4.31	803.43
16123	23.20	16.00	6.94	4.54	34.06	201.48	270.73	239.40	234.08	105.84	26.44	5.01	1167.73
16133	17.41	12.70	5.82	0.84	26.51	153.43	202.39	187.72	148.69	61.88	21.42	5.42	844.24
16146	37.90	21.17	6.92	8.16	53.62	157.43	260.23	252.48	204.90	71.38	38.46	20.38	1133.03
16155	15.01	11.23	6.93	8.33	34.83	118.75	192.86	193.85	153.38	57.03	14.94	8.19	815.32
16225	14.01	12.93	6.75	7.45	35.98	139.25	220.71	205.06	168.77	61.74	14.17	10.09	896.92
16235	24.47	13.44	13.01	15.83	57.36	193.21	281.46	262.84	201.21	81.20	15.76	10.36	1170.14
16258	19.75	18.97	10.13	10.47	34.32	140.19	170.37	166.29	135.25	58.08	11.15	9.30	784.27

Ya que en México no se tiene un buen registro sobre las aguas subterráneas genera que la información sea escasa, en este caso para el acuífero Morelia-Queréndaro se contó con información piezométrica que data de 1995 por lo que se analizó la lluvia ocurrida en ese año Tabla 7.





Tabla 8. Precipitaciones registradas durante el año 1995.

P(mm) Año 1995													
ESTACIÓN	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	ANUAL
11002	2.90	7.80	0.00	1.10	118.20	101.40	79.80	191.20	94.90	14.60	64.10	29.20	705.2
11071	8.40	2.40	0.40	1.40	71.10	126.50	174.90	166.40	124.60	22.90	10.20	27.80	737.0
16052	13.50	11.10	0.00	13.20	62.30	166.80	176.30	213.70	224.70	13.20	15.30	32.50	942.6
16080	4.60	22.30	5.20	12.90	87.00	94.20	146.90	241.43	200.55	16.45	23.62	33.49	888.6
16123	5.50	12.80	0.00	5.00	37.70	280.80	314.66	356.80	191.50	32.30	42.00	22.50	1301.6
16133	0.00	7.00	0.00	13.00	39.70	167.40	174.60	297.30	80.90	45.00	14.00	25.20	864.1
16146	0.00	62.70	0.00	0.00	79.50	140.00	361.50	329.00	222.10	57.00	98.50	122.00	1472.3
16155	0.00	9.10	0.00	4.20	117.80	159.00	129.50	187.00	102.30	11.00	21.50	47.00	788.4
16225	8.60	11.30	11.20	21.80	88.50	122.50	137.30	252.00	141.60	9.20	38.10	38.50	880.6
16235	13.50	3.00	1.50	43.50	67.00	262.00	283.50	280.50	131.40	11.50	54.00	49.00	1200.4
16258	16.00	0.00	0.00	15.50	60.00	111.00	135.20	193.05	104.20	16.38	22.03	46.70	720.1

Como se puede observar la precipitación anual registrada por las estaciones meteorológicas durante el año de 1995 se encuentran en su mayoría por arriba de la media, por lo que se puede ser considerado como un año húmedo.

De las mismas estaciones meteorológicas se generaron las series de temperaturas registradas en el año 1995, Tabla 8.

Tabla 9. Temperatura promedio anual registrada por las estaciones principales en el año 1995.

Temperatura 1995 °C													
ESTACIÓN	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Media
11002	15.87	16.79	18.68	22.07	22.90	22.70	20.90	20.87	19.93	18.76	17.23	14.60	19.28
11071	15.85	17.29	19.20	22.26	24.75	23.63	21.73	21.57	21.05	18.44	17.67	15.88	19.94
16052	14.48	15.76	17.37	18.89	21.29	20.67	19.23	19.86	18.97	16.68	16.36	14.22	17.82
16080	18.02	18.63	20.69	21.59	23.35	22.43	20.87	20.81	18.99	18.27	17.54	16.39	19.80
16123	17.7	19.1	19.7	20.6	21.2	19.5	19.0	17.3	17.0	17.9	17.4	15.7	18.49
16133	22.19	23.88	24.35	25.77	27.06	27.52	26.51	26.70	24.56	23.64	22.47	21.40	24.67
16146	14.18	14.55	15.08	16.48	18.30	19.44	18.44	18.33	18.65	17.27	16.67	14.34	16.81
16155	12.60	13.92	17.24	18.19	19.77	18.93	18.01	17.67	17.29	14.27	14.28	13.04	16.27
16225	13.49	14.71	16.97	19.02	21.37	20.80	19.25	18.94	18.15	15.64	15.74	13.70	17.32
16235	10.85	12.07	13.07	14.38	17.37	17.03	16.09	16.63	15.90	13.81	13.24	10.90	14.28
16258	15.66	16.71	16.91	17.86	20.09	19.46	18.81	18.94	18.95	17.88	16.68	15.33	17.77

En la tabla 8 se puede observar que la temperatura promedio mensual se encuentra por debajo de los 25 grados, en base a los resultados de las precipitaciones y temperaturas se puede decir que es una zona templada con lluvias en verano.





## ANÁLISIS DEL BALANCE HÍDRICO

Este análisis se realizó en base a la NOM-011-CONAGUA-2015 (CONAGUA, 2015). Para lo que se requirió la elaboración de mapas de uso y tipo de suelo.

Michoacán se ha caracterizado por ser uno de los estados de la república con una mayor influencia en el sector agrícola. El cual destaca por su producción en aguacate, fresa, lenteja, durazno, frambuesa sorgo y maíz.

De la misma forma Michoacán es uno de los estados con mayor variedad en la vegetación por lo que se cuenta con grandes extensiones de bosques, por lo que la zona en la que se ubica el acuífero cuenta tanto con zonas de valles, bosques y tierras para el cultivo Figura 17.

### USO Y TIPO DE SUELO

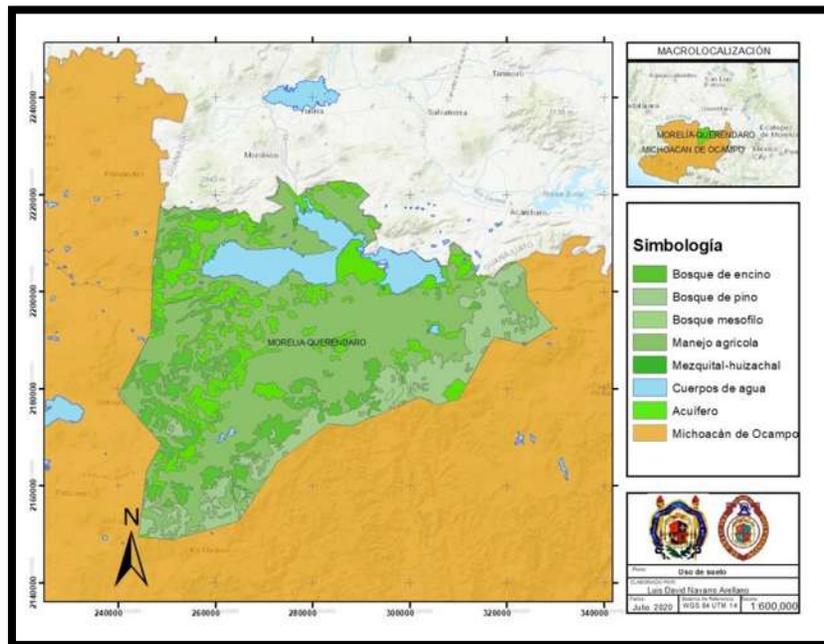


Figura 17. Mapa de uso de suelo en la superficie del acuífero.

En este mapa (Figura 17) se puede observar que más del 70% del área está conformado por uso agrícola, seguida por la presencia de bosques de encino y pino.





De la misma forma se elaboró un mapa del tipo de suelo para así poder ver las características que este puede presentar Figura 18.

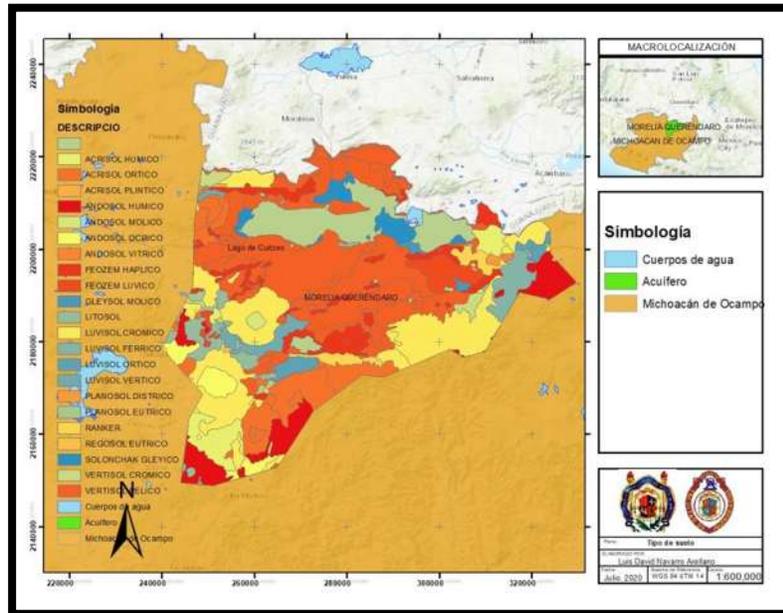


Figura 18. Mapa de tipo de suelo, en el cual destacan los acrisoles y vertisoles.

Con base al mapa de tipo de suelo Figura 18, se pudo observar la presencia de una variedad de acrisoles y vertisoles los cuales son considerados como suelos con una textura fina, estos se presentan en las zonas aledañas al lago debido al arrastre de sedimentos provenientes de las montañas, los acrisoles son suelos muy susceptibles a la erosión mayormente se presenta en zonas forestales, los vertisoles son suelos con alta susceptibilidad a la salinización y muy poca a la erosión.

Con base en a los mapas de uso y tipo de suelo y siguiendo las especificaciones dadas por la NOM-011-CONAGUA-2015, se elaboró un mapa del parámetro K por el cual está conformado todo el acuífero Figura 19.



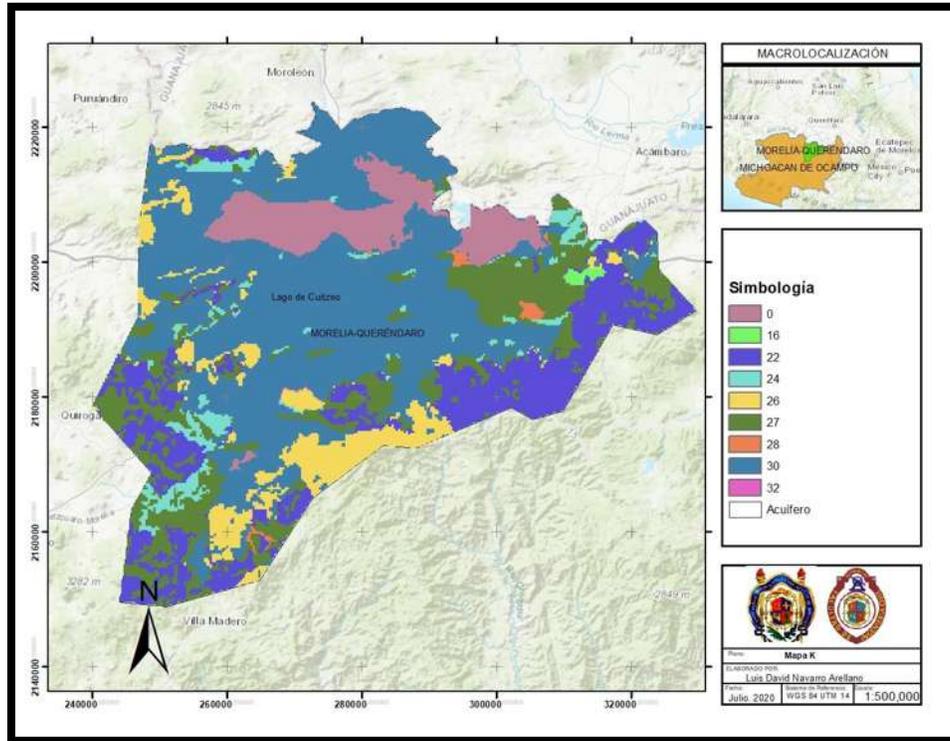


Figura 19. Mapa del parámetro K del acuífero Morelia-Queréndaro.

Los valores de este parámetro están entre los 0.16 y 0.32 a excepción del algo en el cual el valor de K es cero ya que se considera que lo que llueve en esa zona no escurre hacia ningún lado, entre más pequeño sea el parámetro K, quiere decir que habrá un menor escurrimiento en esa zona, el valor de K que predomina sobre el acuífero está constituido por un valor de 0.30 lo que quiere decir que habrá mucho escurrimiento.

Aplicando las ecuaciones [30] y [31] se determinaron los valores del coeficiente de escurrimiento en los cueles se puede observar que los valores oscilan entre el 0 y 0.20 Figura 20.

$$C_e = \frac{K(Pa - 250)}{200} \quad [30] \text{ Sólo si } K \text{ resulta menor o igual que } 0.15.$$

$$C_e = \frac{K(Pa - 250)}{200} + \frac{(K - 0.15)}{1.5} \quad [31] \text{ Sólo si } K \text{ es mayor que } 0.15.$$

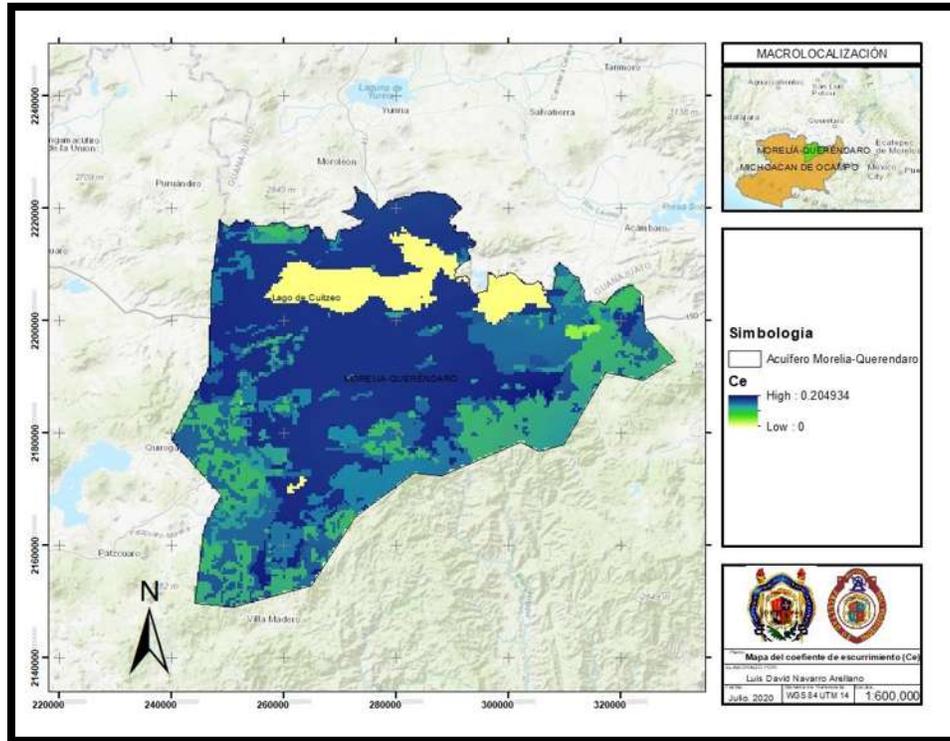


Figura 20. Mapa del Coeficiente de escurrimiento (Ce).

Se puede apreciar que en el mapa de Ce (Figura 20), los valores del coeficiente son mayores en la zona de los valles, esto se debe a que se cuenta un material muy impermeable, a diferencia de las partes altas donde los valores de este coeficiente disminuyen debido a que se cuenta con una gran cantidad de vegetación como son los diferentes tipos de bosques, lo cual sirve como una esponja que detiene al agua de escorrentía.

A partir de las series de precipitación se elaboró un mapa de precipitaciones anual para el año de 1995, en el cual se puede observar que las precipitaciones oscilan entre los 700 y los 1400 mm/anales Figura 21.



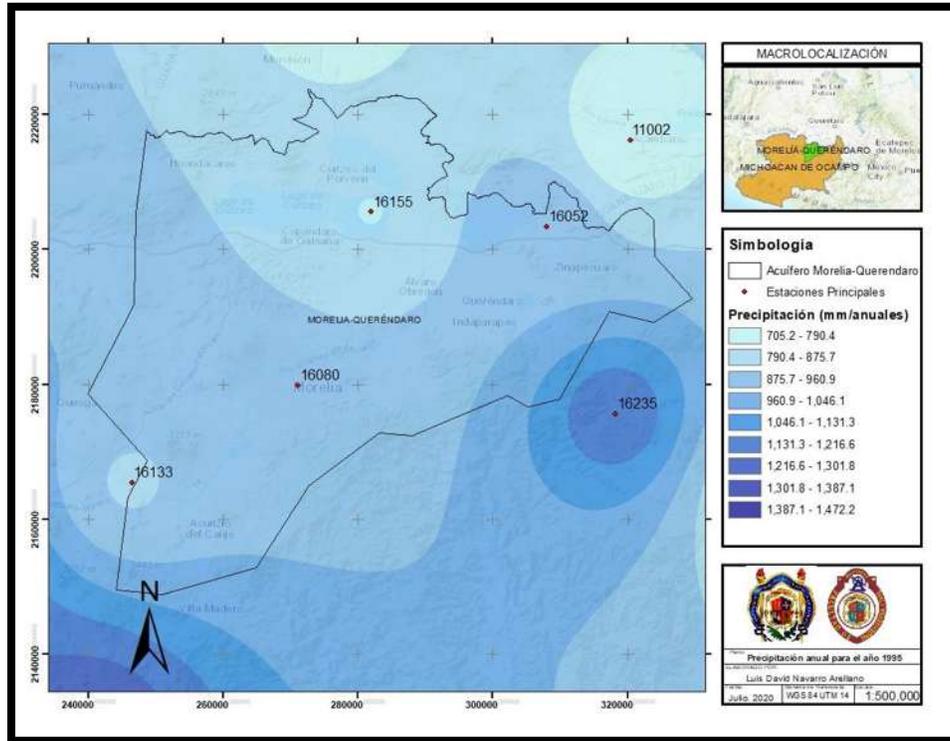


Figura 21. Precipitación anual para el año 1995.

En la figura 21 se puede observar que las precipitaciones máximas ocurren en la zona noroeste las cuales llegan hasta los 1400 mm, y las mínimas en la parte sur muy cerca del lago de Cuitzeo donde llegan hasta los 700 mm/anales.

### PRECIPITACIÓN QUE ESCURRE

Teniendo los mapas de precipitaciones y el de coeficiente de escurrimiento, se hace uso de la Ecuación [29].

$$Pe = Pa * Ce \quad [29]$$

Con la ayuda de un SIG se genera una multiplicación de los mapas. Para así poder obtener un mapa de la precipitación que escurre durante el año de 1995 mostrado en la Figura 22.



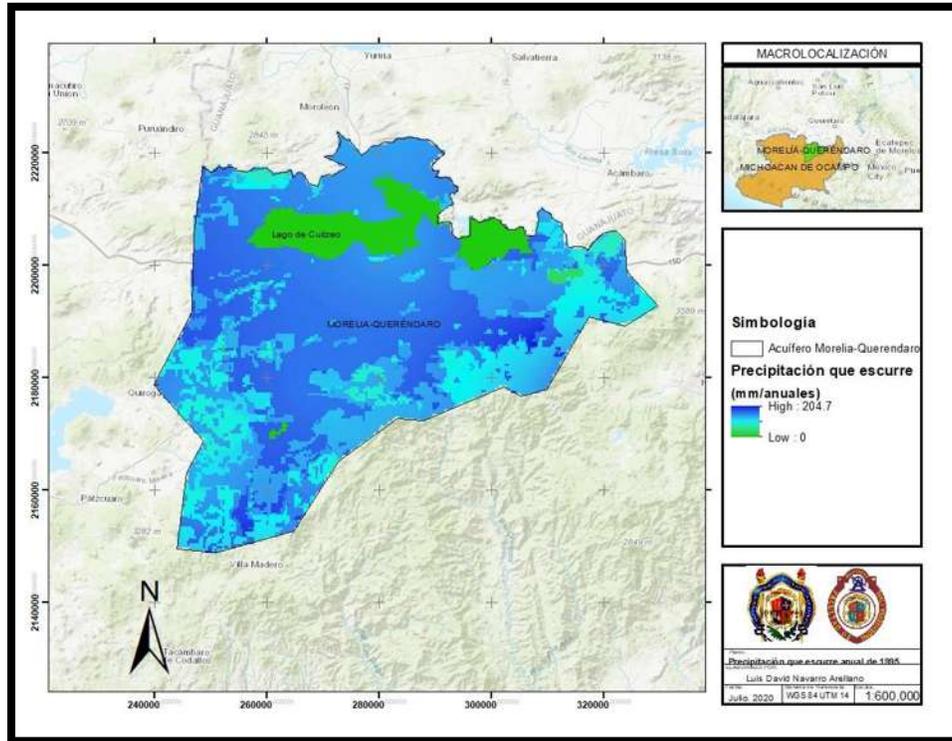


Figura 22. Mapa de precipitación que escurre en el acuífero para el año de 1995.

En este mapa (Figura 22) se pudo analizar que la precipitación que escurre oscila entre los 0 y los 204.7 mm/ anuales aproximadamente. Presentándose los escurrimientos máximos en la zona aledaña al lago, más específicamente sobre el valle, debido a la poca presencia de vegetación que pueda impedir el escurrimiento, también es considerada una escorrentía de 0 en la parte del lago debido a que se idealiza que toda la lluvia que cae sobre el, es infiltración directa para el acuífero.

Como se podía observar desde el mapa con el parámetro K, las zonas donde hay menos escurrimiento resultan ser las zonas cercanas a los parteaguas, esto debido a la presencia de bosques.





EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL

A partir de las series de temperaturas registradas por las estaciones climatológicas y haciendo el uso del método de thornthwaite se realizó el cálculo de la evapotranspiración el cual se muestra en la tabla 9.

Tabla 10. Ejemplo de cálculo de la evapotranspiración real para la estación 16123.

Evt	16123												Latitud
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	19.2
T <sub>j</sub>	17.7	19.1	19.7	20.6	21.2	19.5	19.0	17.3	17.0	17.9	17.4	15.7	
K <sub>a</sub>	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.92	
i <sub>j</sub>	6.77	7.59	7.96	8.53	8.93	7.85	7.53	6.53	6.38	6.87	6.59	5.64	
I	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	
a	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	
U <sub>j</sub>	cm	5.91	6.45	7.83	8.70	9.90	8.26	8.05	6.54	5.86	6.32	5.60	4.51
	mm	59.13	64.47	78.29	86.97	98.95	82.60	80.46	65.45	58.59	63.16	55.97	45.09
P(mm)	5.50	12.80	0.00	5.00	37.70	280.80	314.66	356.80	191.50	32.30	42.00	22.50	1301.56
Evtr	5.50	12.80	0.00	5.00	37.70	82.60	80.46	65.45	58.59	32.30	42.00	22.50	444.90

La evapotranspiración en la mayoría de las estaciones se encuentra por arriba de los 500 mm/anales (Anexo 3), haciendo una comparación con la precipitación anual para el mismo año, nos pudimos dar cuenta que estos valores representarían casi la mitad de la lluvia que cae en la zona Tabla 10.

Tabla 11. Evapotranspiración real de las estaciones principales, durante el año de 1995.

Evtr (mm) 1995													
ESTACIÓN	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	ANUAL
11002	2.90	7.80	0.00	1.10	114.79	101.40	79.80	94.40	79.43	14.60	54.81	29.20	580.23
11071	8.40	2.40	0.40	1.40	71.10	117.41	100.71	96.30	83.85	22.90	10.20	27.80	542.87
16052	13.50	11.10	0.00	13.20	62.30	97.78	88.84	91.37	77.71	13.20	15.30	32.50	516.80
16080	4.60	22.30	5.20	12.90	87.00	94.20	91.77	88.85	67.18	16.45	23.62	33.49	547.57
16123	5.50	12.80	0.00	5.00	37.70	82.60	80.46	65.45	58.59	32.30	42.00	22.50	444.90
16133	0.00	7.00	0.00	13.00	39.70	167.40	153.58	153.18	80.90	45.00	14.00	25.20	698.95
16146	0.00	43.75	0.00	0.00	79.50	87.95	82.56	79.64	75.50	57.00	57.06	43.33	606.30
16155	0.00	9.10	0.00	4.20	60.54	51.85	45.49	41.72	35.80	11.00	17.85	13.12	290.68
16225	8.60	11.30	11.20	21.80	88.50	98.82	88.99	84.31	72.10	9.20	38.10	38.50	571.43
16235	13.50	3.00	1.50	43.50	67.00	79.58	75.37	76.95	66.41	11.50	46.73	34.70	519.74
16258	16.00	0.00	0.00	15.50	60.00	96.13	94.05	92.53	85.28	16.38	22.03	46.70	544.59





Con los valores anuales de la evapotranspiración y con la ayuda de ArcGis se elaboró un mapa de evapotranspiración real anual mostrado en la Figura 23.

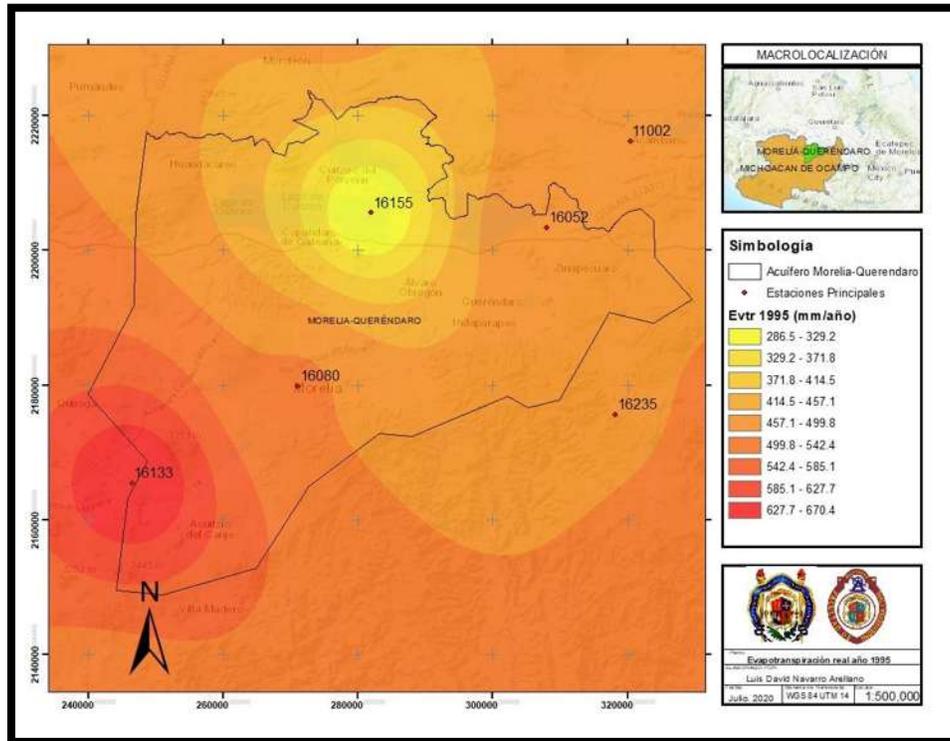


Figura 23. Evapotranspiración real de la zona de estudio, para el año de 1995.

En el mapa de evapotranspiración real (Figura 23) se observa que las evapotranspiraciones mínimas rondan entre los 280 mm/año se ubican en la zona norte del acuífero, más específicamente en la zona aledaña al lago de Cuitzeo. Las evapotranspiraciones máximas se localizan en la zona suroeste del acuífero, presentando evapotranspiraciones de hasta los 670 mm/año, la evapotranspiración calculada por el método de Thorntwaite depende mucho de la ubicación en la que se encuentra la estación ya que esto influye mucho en la exposición del sol que tiene durante los meses del año, otro de los factores que influye es la temperatura que hay en el lugar, por lo que en los lugares donde se tenga registrada una mayor temperatura y su exposición al sol durante al año se larga se generaran zonas de gran evapotranspiración.



## INFILTRACIÓN

Teniendo los mapas de precipitación, evapotranspiración y de precipitación que escurre todos estos definidos en un mismo rango de tiempo que fue el año 1995, se procedió a realizar un balance hídrico por medio de mapas con la ayuda del software ArcGis utilizando la Ecuación [36].

$$\text{Infiltración} = Pa - Evtr - Pe$$

Donde:

Pa = precipitación anual. Evtr = Evapotranspiración real.

Pe = Precipitación que escurre.

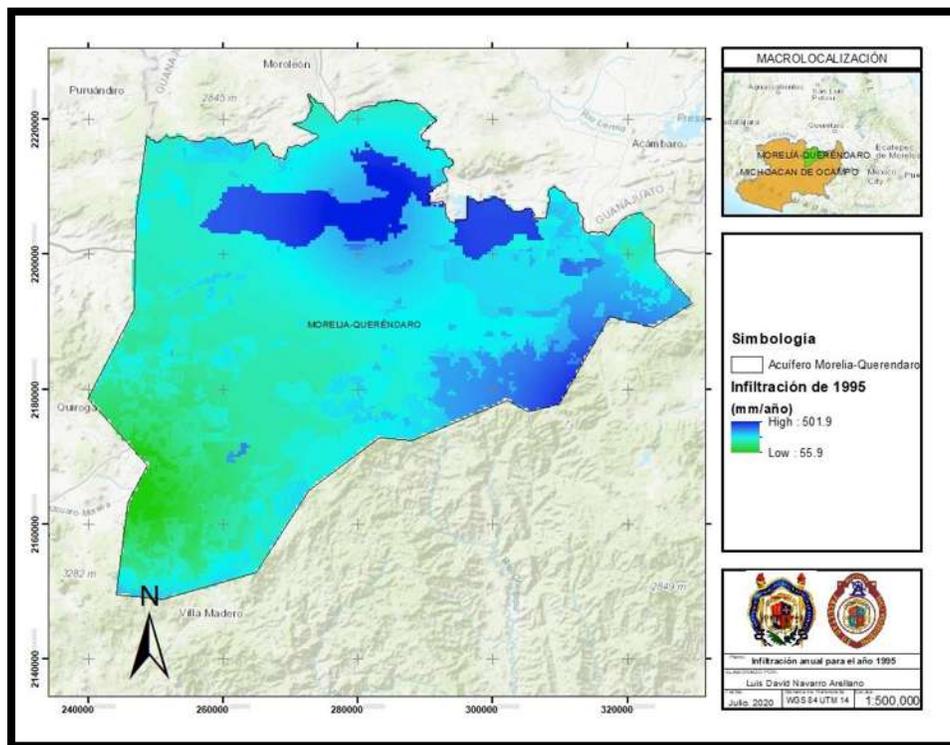


Figura 24. Infiltración anual para el año 1995.

En la Figura 24 se puede observar que las mayores infiltraciones para este año se encuentran localizadas en la parte norte y este del acuífero, donde los valores



rondan alrededor de los 500 mm/año, a diferencia de la zona suroeste donde la infiltración anual está entre los 56 mm/año, este cambio tan drástico en la infiltración se debe a que en la zona suroeste se presentan los puntos donde ocurre la mayor evapotranspiración por lo que esto genera que el agua de lluvia tenga una mayor dificultad para infiltrarse hacia el acuífero.

### DISTRITO DE RIEGO 020 MORELIA-QUERÉNDARO

Dentro del acuífero se encuentra el distrito de riego 020 Morelia-Queréndaro Figura 25, el cual con una extensión total de 198.52 km<sup>2</sup> y está formado por 6 módulos de riego, ubicados en la zona de Morelia y municipios anexos a la zona (Álvaro Obregón, Queréndaro, Indaparapeo, Charo, Tzurumutaro, Tarímbaro, Tzintzimeo). Este distrito riega anualmente un total de 107.17 Hm<sup>3</sup> de agua, de donde sus principales fuentes de abastecimiento son la presa de Cointzio, presa Malpaís y agua proveniente del acuífero Morelia-Queréndaro, de este riego anual se considera un retorno del 10% hacia el acuífero.

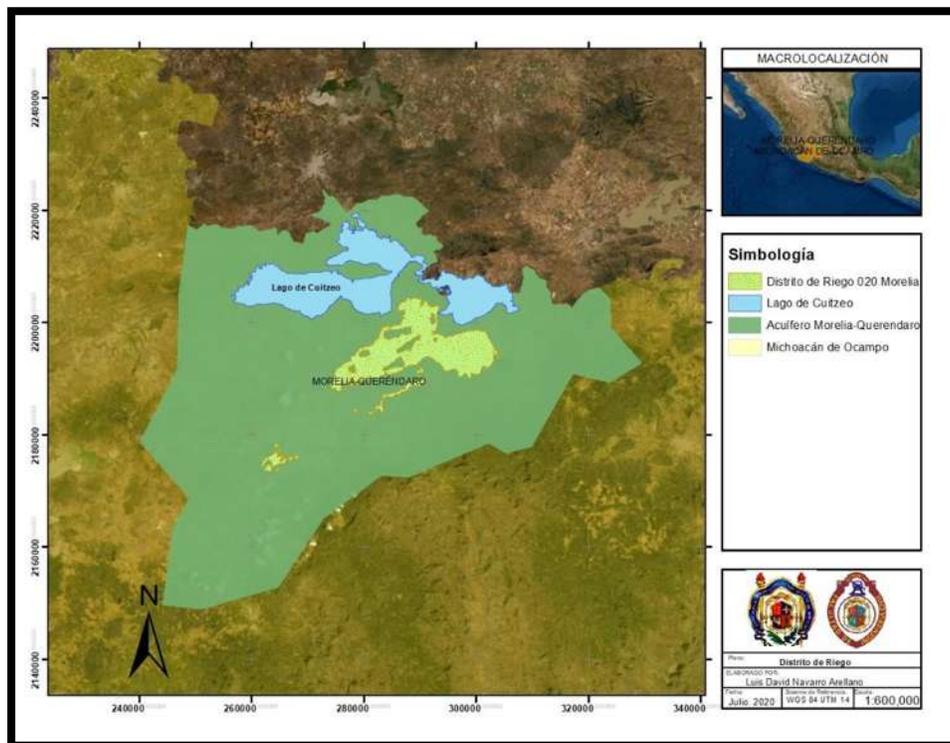


Figura 25. Distrito de riego 020 Morelia-Queréndaro.





## CARACTERIZACIÓN SUBTERRÁNEA

Ya que se había determinado la caracterización superficial se procedió a realizar un análisis subterráneo para poder definir las características del acuífero.

### EXTRACCIONES

Una parte importante para la modelación subterránea es tener conocimiento de la localización de los pozos de extracción, así como el volumen de extracción concesionado dentro del acuífero en estudio, esta información se consultó la base de datos nacional del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) (REPDA, 2020) de la cual se obtuvieron un total de 1232 registros de concesiones Figura 26.

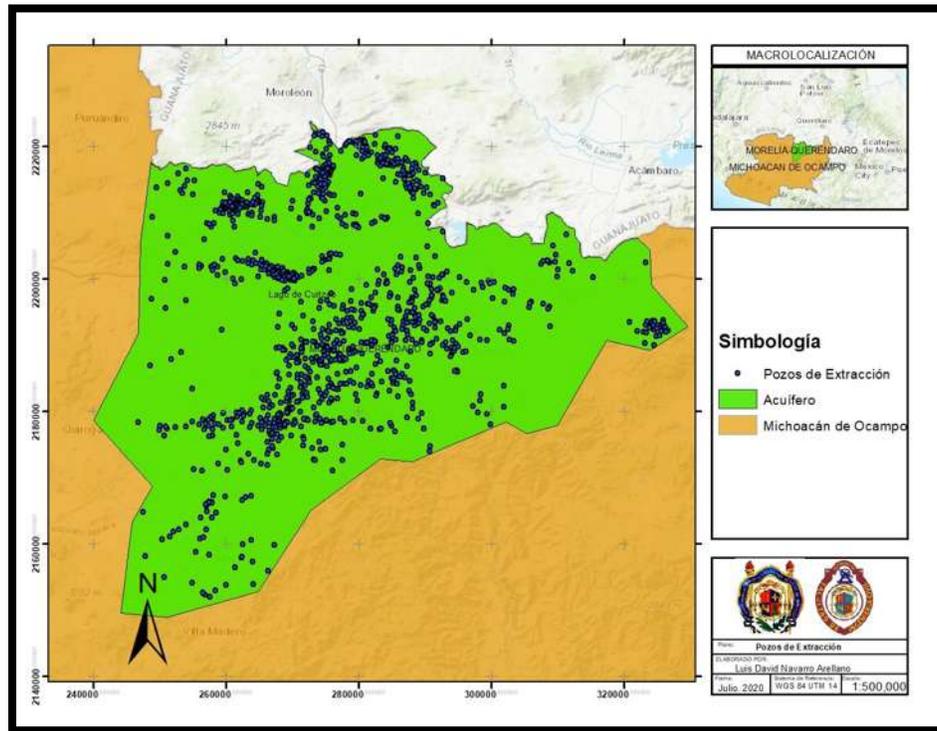


Figura 26. Distribución de los pozos de extracción en el acuífero Morelia-Queréndaro.

En la Figura 26 puede apreciarse que los pozos se concentran en 3 puntos importantes; la zona urbana de la ciudad de Morelia, sobre el distrito de riego 020 y en alrededor del lago de Cuitzeo.





El acuífero cuenta con un total de 1232 registros de concesiones, distribuidos en toda su superficie, El volumen total anual concesionado es de 171.9 Hm<sup>3</sup>, los cuales se dividen en un total de 8 tipos de usos consuntivos, de estos 8 los que más destacan son el uso Agrícola el cual cuenta con un total de 694 concesiones y un volumen anual concesionado de 87.08 Hm<sup>3</sup>., Seguido por el uso Público Urbano el cual cuenta con un total de 271 concesiones y un volumen anual concesionado de 44.69 Hm<sup>3</sup> Tabla 11., De esta información se pudo analizar que poco más del 50% de agua extraída del acuífero está destinada al uso agrícola Figura 27.

Tabla 12. Volumen concesionado por extracción para los distintos usos consuntivos en el acuífero Morelia-Queréndaro.

Uso	Hm <sup>3</sup> /año	Concesiones
ACUACULTURA	0.05	2
AGRICOLA	87.08	694
DIFERENTES USOS	5.71	84
DOMESTICO	0.65	17
INDUSTRIAL	28.49	75
PECUARIO	0.17	9
PUBLICO URBANO	44.69	271
SERVICIOS	5.09	80
Total	171.92	1232

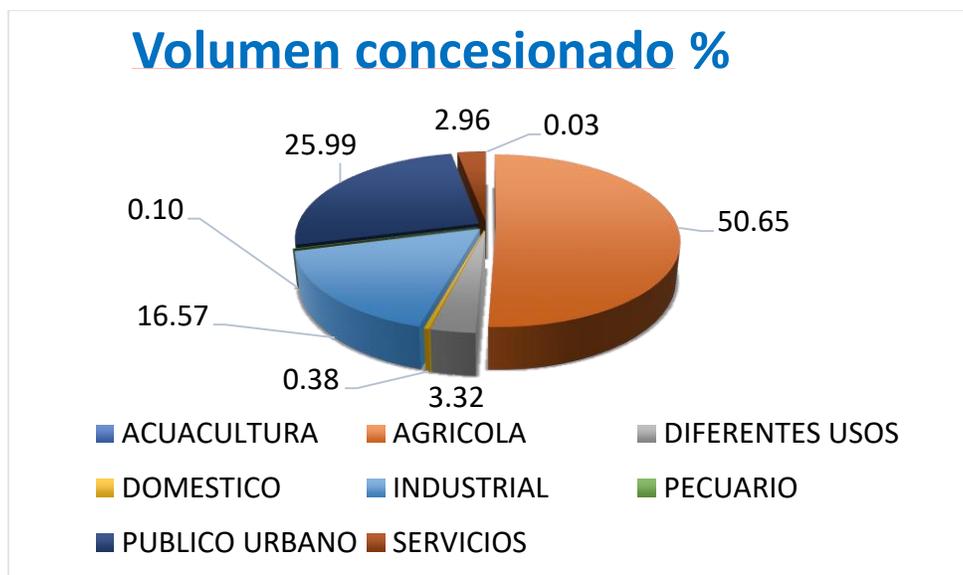


Figura 27. Representación del volumen concesionado por extracción para cada uso consuntivo.





## MANANTIALES

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

De igual forma que las concesiones para pozos de extracción, el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), cuenta con un registro para llevar un control sobre el aprovechamiento de las aguas provenientes de manantiales.

El aprovechamiento de aguas proveniente por manantiales cuenta con un total de 337 concesiones, localizadas principalmente en las zonas aledañas a los parteaguas de la cuenca 51, con una concentración mayor en la parte este del acuífero que es donde se ubica la región de los azufres, caracterizada por tener muchos puntos donde emergen aguas termales Figura 28.

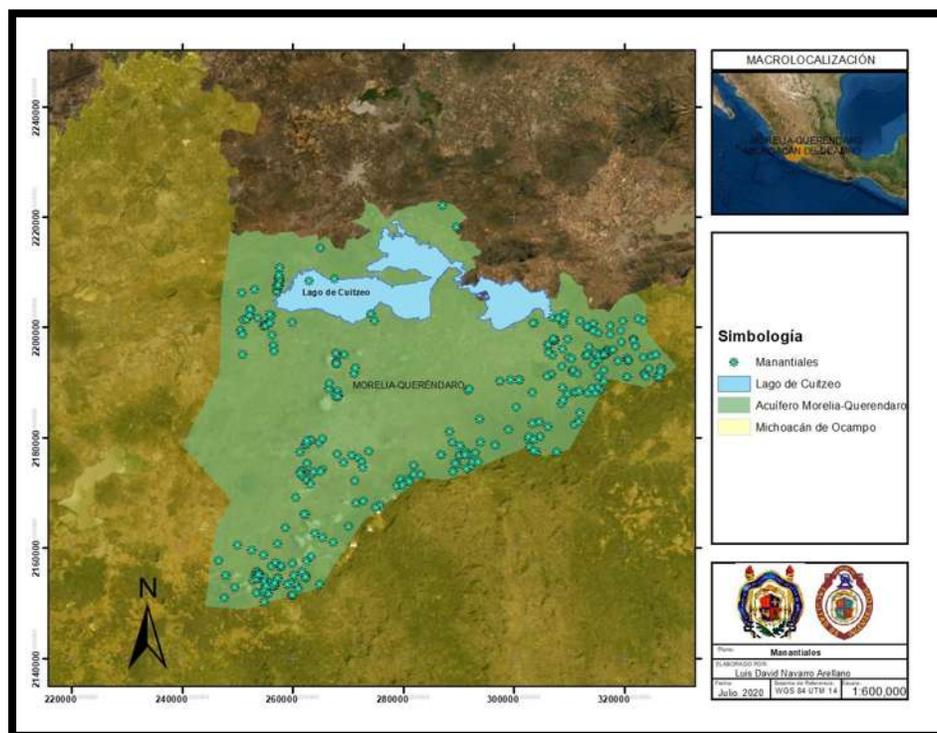


Figura 28. Localización de las concesiones por manantiales.





El acuífero cuenta con un total de 337 registros de concesiones por manantiales, distribuidos en toda su superficie, El volumen total anual concesionado es de 91.92 Hm<sup>3</sup>, los cuales se dividen en un total de 8 tipos de usos consuntivos, de estos 8 los que más destacan son el uso Público Urbano el cual cuenta con un total de 130 concesiones y un volumen anual concesionado de 39.51 Hm<sup>3</sup>., Seguido por el uso Agrícola el cual cuenta con un total de 89 concesiones y un volumen anual concesionado de 16.46 Hm<sup>3</sup> Tabla 12., De esta información se pudo analizar que poco más del 40% del agua de manantiales está destinada al uso Público Urbano Figura 29.

Tabla 13. Volumen por manantiales concesionado para los distintos usos consuntivos en el acuífero Morelia-Queréndaro

Uso	Hm <sup>3</sup> /año	Concesiones
ACUACULTURA	1.35	10
AGRÍCOLA	16.46	89
DIFERENTES USOS	5.37	46
DOMÉSTICO	1.00	31
PECUARIO	0.00	3
INDUSTRIAL	11.04	4
PÚBLICO URBANO	39.51	130
SERVICIOS	17.19	24
Total	91.92	337

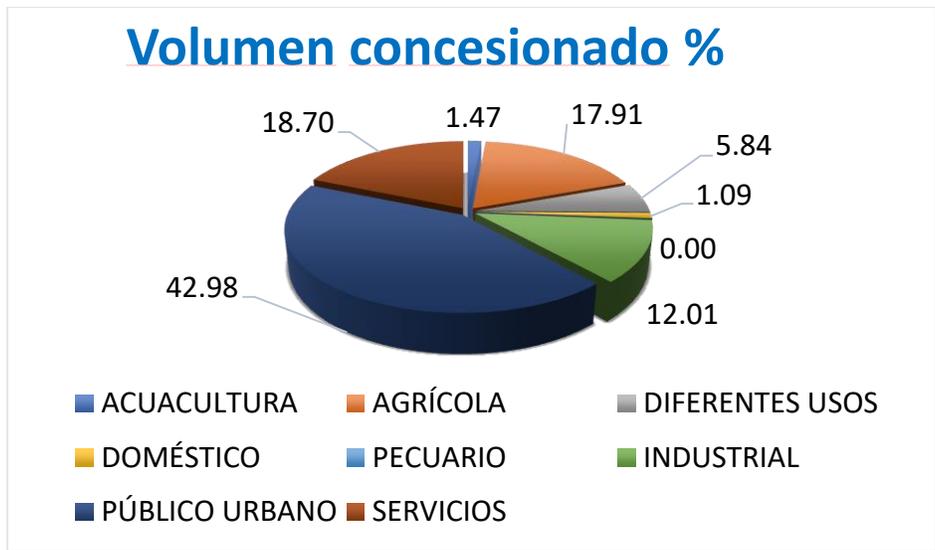


Figura 29. Representación del volumen concesionado por manantiales para cada uso consuntivo.





### VOLUMEN TOTAL CONCESIONADO

Tabla 14. Volumen total concesionado del acuífero Morelia-Queréndaro.

Uso	Hm <sup>3</sup> /año
ACUACULTURA	1.4
AGRÍCOLA	103.54
DIFERENTES USOS	11.08
DOMÉSTICO	1.65
PECUARIO	0.17
INDUSTRIAL	39.53
PÚBLICO URBANO	84.1
SERVICIOS	22.28
<b>Total</b>	<b>263.75</b>

Al sumar los volúmenes concesionados tanto de las extracciones por bombeo como los manantiales se determinó el volumen total concesionado del acuífero el cual resultó ser de 263.75 Hm<sup>3</sup>/año Tabla 13.

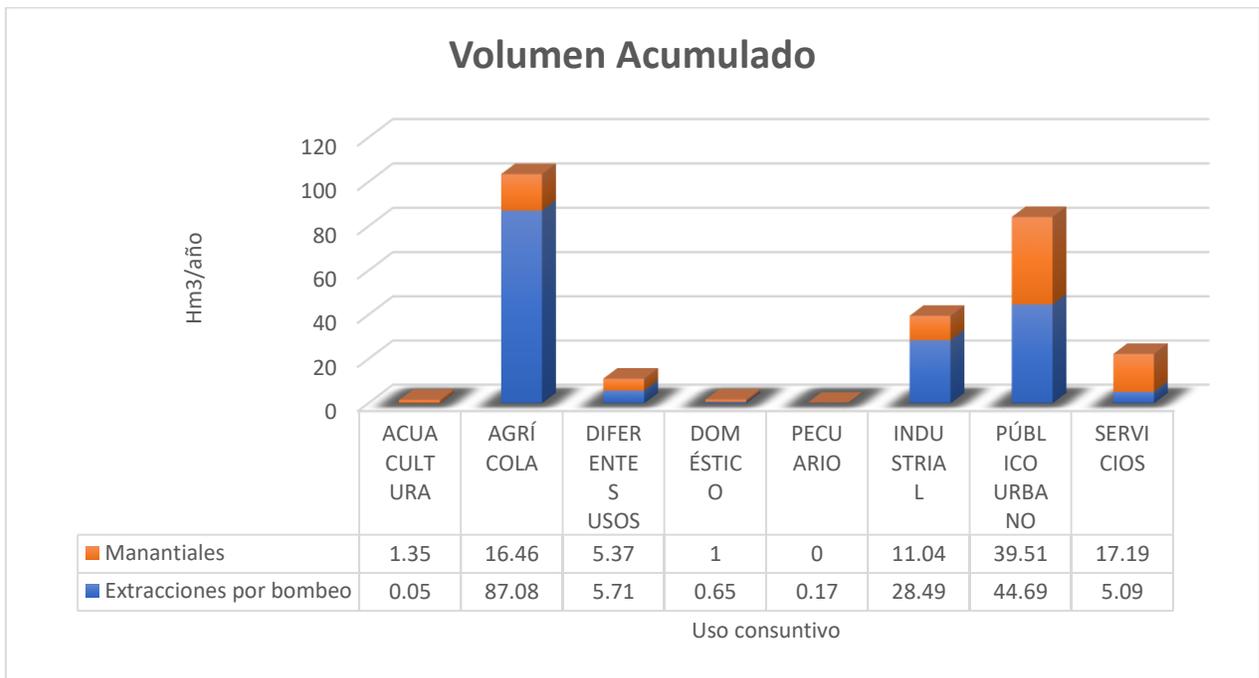


Figura 30. Volumen acumulado paraca cada uso consuntivo.

En la figura 30 se aprecia el volumen acumulado para cada uso consuntivo en el cual se puede observar que el uso consuntivo agrícola es el que más volumen aprovecha, teniendo un total de 103 Hm<sup>3</sup>/año, seguido por el uso Público Urbano con un total de 84.1 Hm<sup>3</sup>/año.





Estos usos consuntivos (Agrícola y Público urbano) juntos representan más del 50% del volumen total concesionado, siendo el Agrícola el mayor de estos dos representando un 39.3 del volumen total Figura 31.

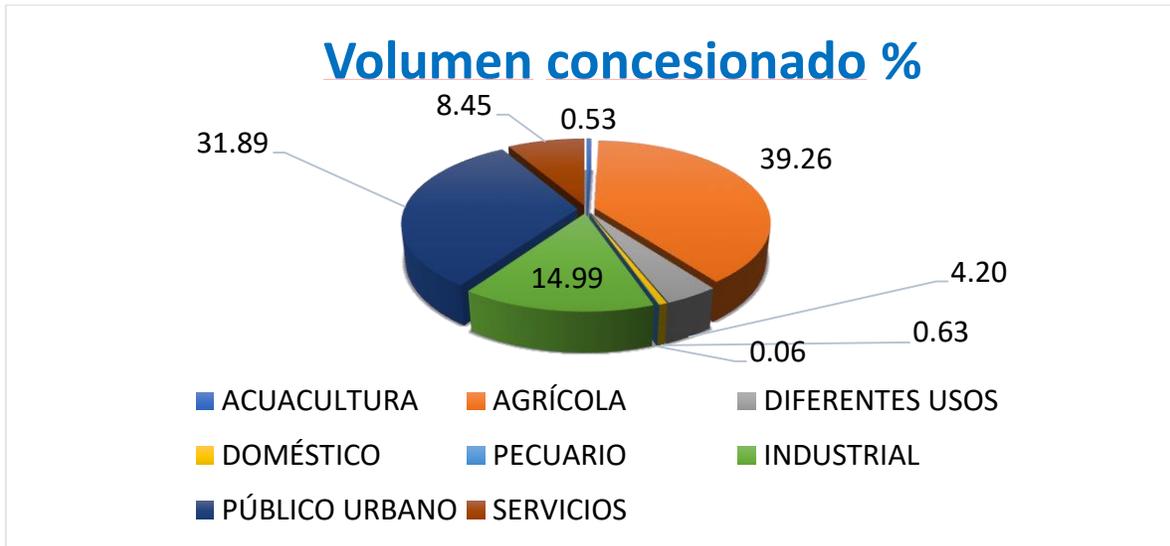


Figura 31. Representación del volumen total acumulado que es concesionado para los diferentes usos consuntivos.

## GEOLOGÍA DEL ACUÍFERO

Se realizó un mapa de geología en el cual se presentan 4 principales unidades geológicas Figura 32, las cuales son:

- Depósitos Aluviales: Estos se encuentran en la zona norte del acuífero, específicamente en el valle y el lago de Cuitzeo.
- Volcanoclásticas: Este es un conjunto muy pequeño en comparación de los otros y sólo se encuentra aglomerado en la parte central del acuífero.
- Ígneas Extrusivas básicas: Es el tipo de geología predominante en el acuífero presentándose mayormente en la parte sur y suroeste.
- Ígneas Extrusivas Ácidas: Esta unidad geológica predomina principalmente en la zona de los azufres y en zonas aledañas al lago de Cuitzeo.



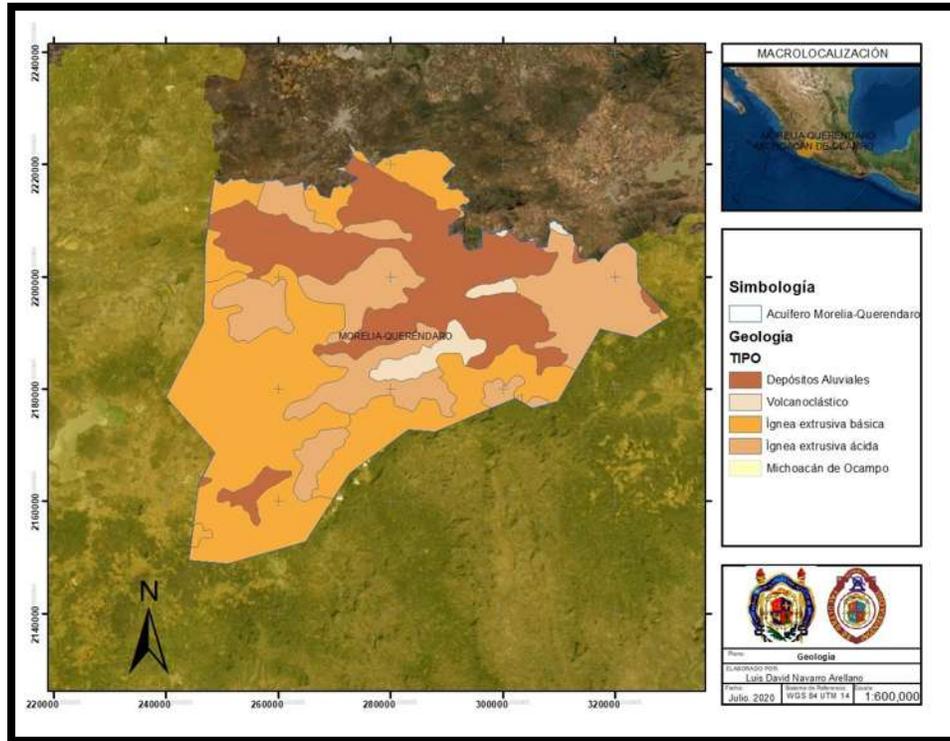


Figura 32. Geología presente en el acuífero Morelia-Queréndaro.

Con base en la información de las diferentes geologías se definen los rangos para los valores de porosidad y conductividad hidráulica, cabe mencionar que éstos valores son los que se modifican para así, encontrar la calibración correcta del modelo Tabla 14, según datos de (CONAGUA, 20 de Abril 2015) el acuífero tiene un espesor de entre los 300 hasta 500 m.

Tabla 15. Rango de valores de porosidad y conductividad hidráulica.

Geología	Porosidad (%)		Conductividad Hidráulica (m/día)
	Total	Eficaz	
Depósitos aluviales	20-50	10-28	0.1-50
Ígnea Extrusiva Básica	1-10	0.00005-0.01	0.001-25
Ígnea Extrusiva Ácida	1-10	0.00005-0.01	0.001-25
Volcanoclástica	1-10	0.00005-0.01	10-8 – 2*10-4

Estos valores resultaron de las investigaciones de los autores (DOMENICO, 1998), (FETTER, 2001), (FREEZE, 1998), (SANDERS, 1993), (SMITH, 1993) Anexo 4.

## NIVEL ESTÁTICO

Con base en la información de CONAGUA (CONAGUA, 20 abril 2015), se realizó un mapa del nivel estático en el cual se puede analizar el comportamiento del agua Figura 33.

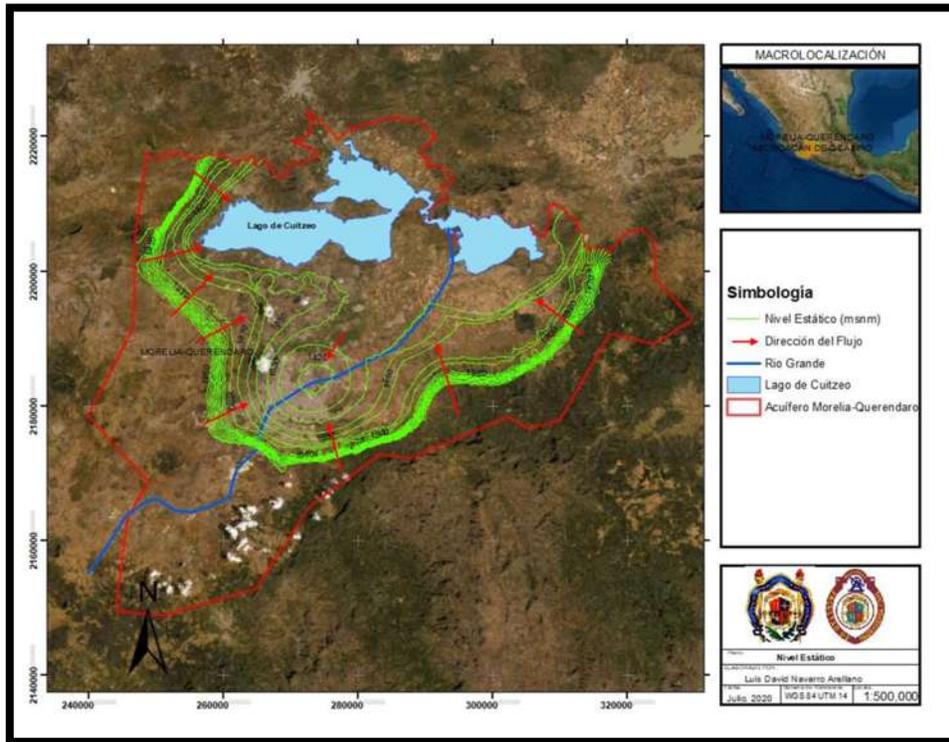


Figura 33. Mapa del comportamiento del nivel estático según datos de la CONAGUA.

En este mapa (Figura 33) se puede observar que las zonas de recarga del acuífero provienen de las montañas (parteaguas) y se dirigen hacia la zona del lago de Cuitzeo además de que se pueden observar dos principales zonas de descarga, las cuales son el lago de Cuitzeo que es donde llega la mayor parte del agua subterránea y superficial, y el otro punto de descarga es la zona metropolitana de la ciudad de Morelia debido a la gran concentración de población.

Teniendo esta información en un sistema de información geográfica se realizó una comparación entre el nivel estático del Río Grande de Morelia y el nivel estático del acuífero mostrado en la Figura 34.

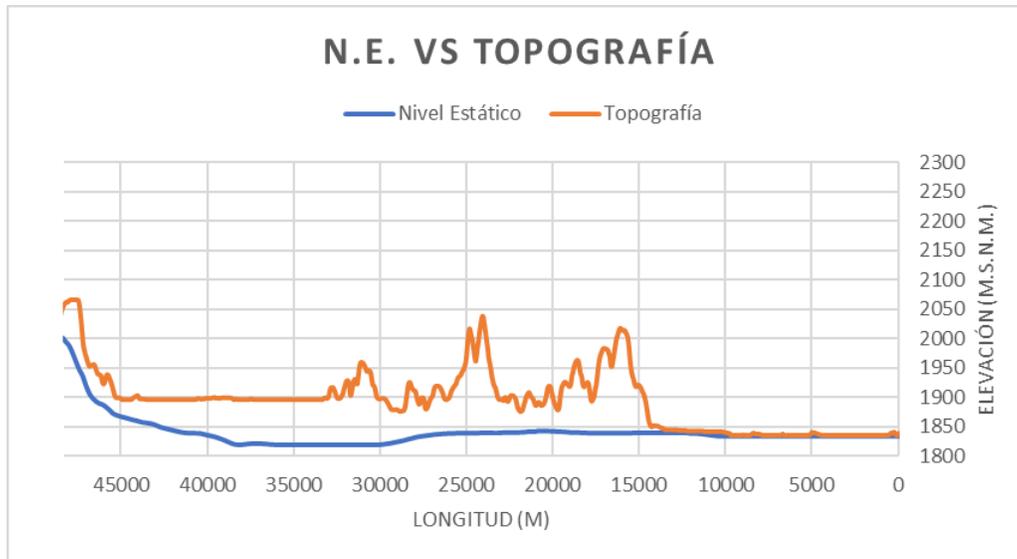


Figura 34. Gráfica de la comparación del nivel estático contra la topografía del río Grande.

En esta gráfica (Figura 34) se puede observar que el nivel estático del acuífero está muy por debajo del nivel topográfico del río, ya que se encuentra en algunos puntos hasta por debajo de los 200 m (zonas de la ciudad de Morelia) y otras entre los 10 metros, que es en la parte del valle y cercanías al lago de Cuitzeo., por lo que se determinó que no existe una relación río acuífero.

### MODELO EN MODFLOW

Como ya se mencionó anteriormente 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.





Todos estos paquetes se generan a partir de los mapas e información mencionada anteriormente.

### DISCRETIZACIÓN DEL MODELO

El modelo que se generó constaba de una malla cuadrícula de 47 columnas por 40 renglones con una dimensión de 2 km x 2 km, el cual nos da como resultado un total de 1880 celdas, de las cuales 806 son celdas activas donde se utilizarán las ecuaciones de flujo para simular el movimiento del agua y 79 celdas de nivel constante las cuales representan al lago de Cuitzeo Figura 35.

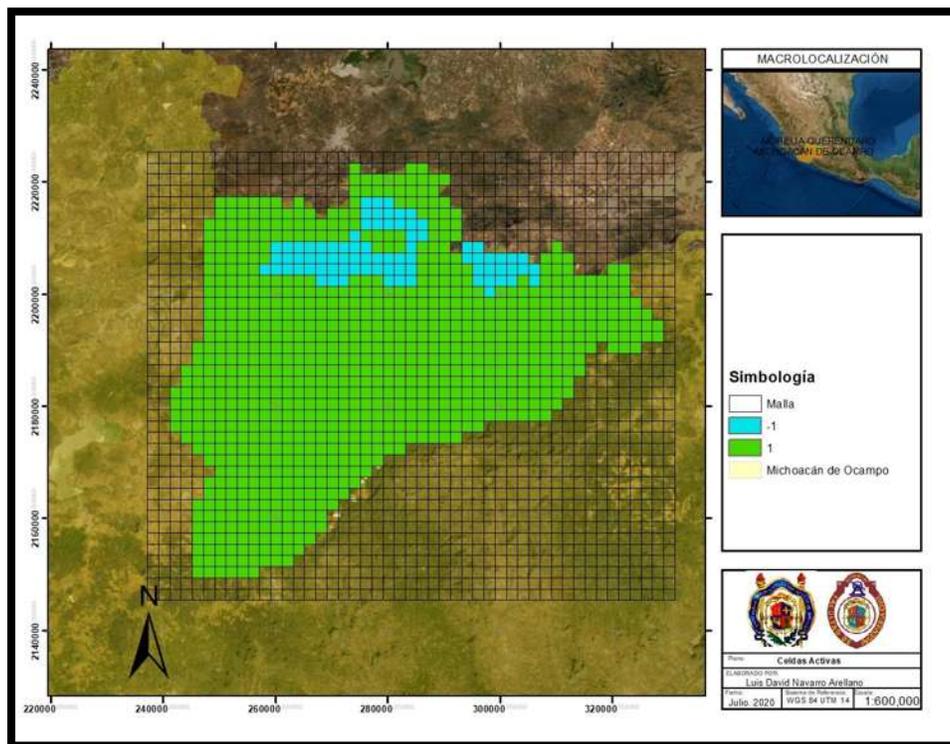


Figura 35. Discretización del acuífero Morelia-Queréndaro para ser usado en el software MODFLOW.

Las celdas activas se definen con el número “1”, las celdas inactivas con el número “0” y las de nivel constante con “-1”.





Una vez definida la discretización del modelo en MODFLOW se colocaron todos los paquetes requeridos en forma de malla Figura 36.

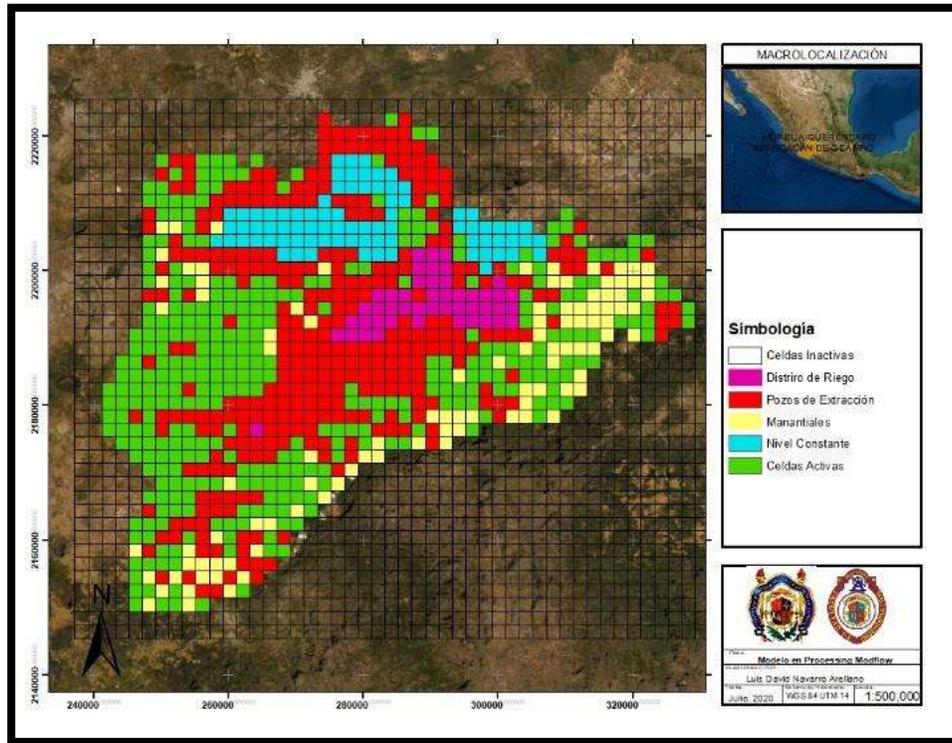


Figura 36. Mapa de la representación de todas las acciones elementales por las que estará sometido el modelo en MODFLOW.

La Figura 36 representa todas las acciones que ayudarán generar las simulaciones en el software MODFLOW, las corridas que se realizaron fueron en unidades de un año (1995) y el proceso es estar iterando con los valores de la conductividad hidráulica para lograr que concuerden los niveles estáticos medidos en 1995 con los simulados por el software.





Después de generar múltiples corridas en MODFLOW se obtuvo el siguiente modelo.

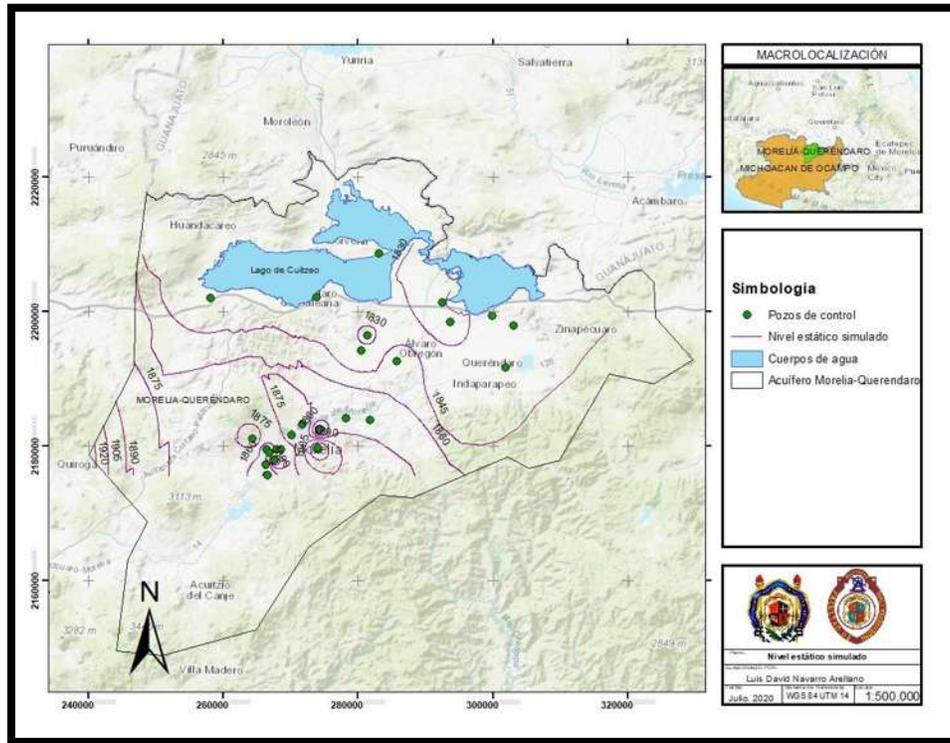


Figura 37. Nivel estático simulado en el software MODFLOW.

En la Figura 37 se pueden observar los resultados de mejor calibración a la que se llegó en software MODFLOW, en la imagen se aprecia que el sentido del agua concuerda con los niveles observados, este sentido va de la parte suroeste a la noreste, presentando las zonas de recarga en las montañas, las cuales descargar hacia la parte del lago de Cuitzeo, también se presentan unos puntos de abatimientos en la zona de la ciudad de Morelia, esto debido a la concentración de pozos concesionados para el uso público urbano.

En la tabla 16 se muestra la diferencia que existe entre el nivel observado y el nivel simulado de los distintos pozos de control en los cuales se contaba con un registro medido en el año de 1995.

Tabla 16. Diferencia entre el nivel observado contra el nivel simulado de los pozos de control.

Pozo	Observado	Simulado	Diferencia
1	1829.21	1827.4	-1.81





2	1841.33	1830.83	-10.5
3	1837.8	1832.26	-5.54
4	1834.4	1821.04	-13.36
5	1844	1843.4	-0.6
6	1853.8	1851.53	-2.27
7	1847	1838.62	-8.38
8	1846.1	1832	-14.1
9	1838	1830.2	-7.8
10	1861	1859.49	-1.51
11	1838	1823.4	-14.6
12	1877.7	1869.1	-8.6
13	1881.33	1872.95	-8.38
14	1896.3	1887.78	-8.52
15	1898.4	1887.46	-10.94
16	1848	1829.3	-18.7
17	2003.25	1890.31	-112.94
18	1864.1	1845.8	-18.3
19	1874.43	1857.59	-16.84
20	1949.56	1919.56	-30
21	1886.65	1856.3	-30.35
22	1964.65	1920.4	-44.25
23	1866.55	1838.59	-27.96

En la figura 38. Se muestra la comparación entre el nivel observado vs el simulado.

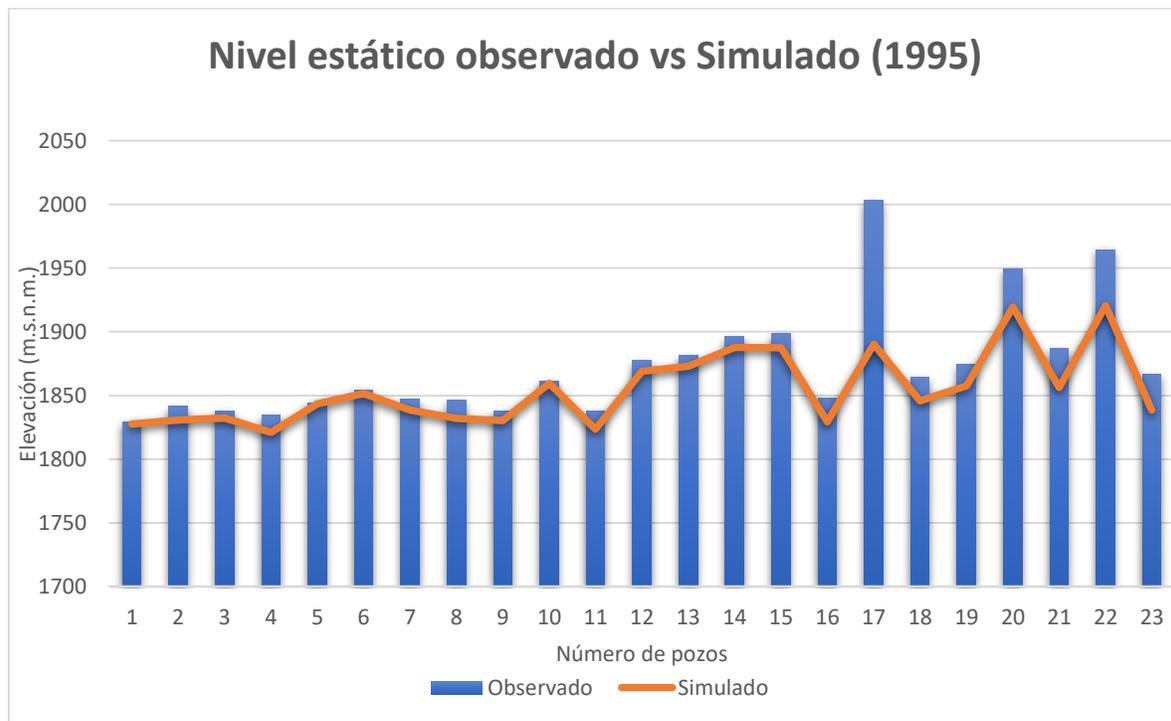


Figura 38. Comparación del nivel estático contra el nivel simulado del acuífero.





En esta gráfica (Figura 38) se puede observar que los niveles simulados aún se encuentran por debajo de los niveles observados, esto debido a que el modelo presentaba complicaciones en la simulación ya que con la información que se cuenta para las aguas subterráneas es muy escasa, lo que genera que en unas zonas se complique la calibración, aun con esto se logró representar la tendencia y comportamiento del acuífero como se puede apreciar que la zona que se acerca al lago las diferencias fueron mucho menores, sólo fueron tres pozos en los cuales la diferencia fue más notoria.

Por último, se analizaron los resultados con el fin de saber si se puede confiar en la información obtenida, para esto se realizaron pruebas de bondad y ajuste obteniendo la siguiente clasificación Tabla 17.

Tabla 17. Resultados de las pruebas de bondad de ajuste.

NSE	0.56	Satisfactoria
LN NSE	0.57	Satisfactoria
r	0.88	Muy buena
CS	1.00	Muy buena

De acuerdo a los valores de bondad de ajuste la calibración del modelo resulta ser satisfactoria, que dentro de la elaboración de modelos de aguas subterráneas en México resulta ser bastante buena ya que se cuenta con tan poca información dentro de esta área que en muchos casos no se puede llegar a una representación correcta de las aguas en el sistema acuífero.





## CONCLUSIONES

Debido a que la falta de información Hidrológica en México es muy notoria y la información con la que se cuenta muchas veces es de mala calidad, se deben de realizar una gestión de datos lo mejor posible aplicando la mayoría de pruebas estadísticas, ya que al hacer esto estamos garantizando que la información con la que se está trabajando se apega más a la realidad, por lo que se podrá llegar a unos resultados confiables y efectivos con mayor facilidad., La información utilizada para esta investigación, al ser evaluada por distintos filtros de criterios y pruebas resulta ser factible para utilizarse en cualquier otro análisis hidrológico.

Respecto el balance hídrico, los resultados obtenidos se pueden considerar como muy buenos ya que la información con la que se elaboró fue tratada y validada con diferentes pruebas estadísticas además de que se tomó en cuenta la NOM-011-CONAGUA-2015 y se evaluó de forma distribuida en todo el acuífero por lo que esto nos ayuda a obtener resultados más apegados a la realidad.

Respecto a la modelación subterránea, como se sabe a diferencia de las modelaciones superficiales estas se complican un poco más debido a la escases de información en México, pero esto no quiere decir que sean imposibles., Como se pudo observar en esta modelación las principales zonas de recarga del acuífero se encuentran en las montañas, a su vez que, aunque el acuífero tenga una concesión mayor hacia el uso agrícola este no está afectando tanto ya que se encuentra en forma distribuida en cambio el uso público urbano está generando conos de abatimiento en la ciudad de Morelia debido a que la extracción se encuentra concentrada en una zona más pequeña. Aunque los niveles piezómetros simulados varían con respecto a los niveles observados, el comportamiento que tuvo el modelo fue favorable ya que las direcciones de flujo así como las zonas de recarga y descarga coincidiendo con los publicados por en el informe Hídrico de CONAGUA.

Los modelos subterráneos nos ayudan a ver el comportamiento de los acuíferos ante las acciones de extracción, por lo que es posible ubicar las zonas de mayor afectación y distinguir en sí cuál es el uso consuntivo que está causando un impacto





más representativo., Estos modelos además de que son una muy buena opción para poder llevar una gestión sobre el recurso hídrico con el que se cuenta, nos son útiles para poder hacer estudios sobre el futuro comportamiento de los acuíferos y poder ir previendo los posibles escenarios que se puedan presentar con el fin de tomar acciones al respecto.

Esta área de investigación en México está muy abandonada, lo que ha provocado que muchos acuíferos de la república se encuentren en estado de veda, por lo que falta mucho que hacer, para lograr conseguir una buena gestión sobre el recurso subterráneo y una buena forma de contribuir es con la caracterización de estos.





## BIBLIOGRAFÍAS

Agua (2017). Agua en el planeta. Agua.org.mx obtenido de: <https://agua.org.mx/en-el-planeta/>

Aparicio, F. (1992), **Fundamentos de hidrología de superficie**. México: Limusa

Campos A, Daniel. 2011. **Estimación y aprovechamiento del escurrimiento. Primera**. San Luis Potosí.

Cázarez Rodríguez, E. (2021), **Gestión de la sequía operativa en el sistema de recursos hídricos de la cuenca del Rio Duero, Michoacán**. Mexico: U.M.S.N.H.

CONABIO (2021). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad Obtenido de <https://www.gob.mx/conabio/que-hacemos>

CONAGUA (20 de Abril 2015). **Comisión Nacional del Agua, “Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro (1602), Estado de Michoacán”**. México: Diario Oficial de la Federación.

CONAGUA (2010). **Agua en México: cauces y encauces**. Gobierno de México obtenido, [de: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/elaguaenmexico-caucesyencauces.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/elaguaenmexico-caucesyencauces.pdf)

CONAGUA (2012). **Registro Público de Derechos del Agua**. México obtenido de [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/MemoriaDocumentalREPDA5\\_12\\_2012.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/MemoriaDocumentalREPDA5_12_2012.pdf)

CONAGUA (2015). **Norma oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determina la disponibilidad media anual de las aguas nacionales**. México: Diario Oficial de la Federación.

CONAGUA (9 de octubre 2019). **Agua en el Mundo**. Gobierno de México obtenido, de: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/agua-en-el-mundo>

Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN a través de su plataforma web del CICESE (<http://clicom-mex.cicese.mx>)

DOMENICO, P. A. & SCHWARTZ, F. W. (1998).- **Physical and Chemical Hydrogeology**. Wiley, 502pp.

Esri. (2016). Plataforma ArcGIS. Obtenido de Plataforma ArcGIS: <http://www.sigsa.info/productos/esri/plataforma-arccgis>

Fetter, C. W. (2001), Applied Hydrogeology. Prentice-Hall, 4ª ed., 598 pp.





- FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. (1979), **Groundwater**. Prentice-Hall, 604 pp.
- Harbaugh, A. (2005), **MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model**. Estados Unidos: U.S. Geological Survey.
- INEGI (2021). Instituto nacional de Estadística y Geografía. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/inegi/contenido/instituto.html>
- INEGI (febrero 2021). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Martínez, A., Martínez, S., Castaño, S. (2006), **Fundamentos de Hidrogeología**. Madrid, España: Mundi Prensa.
- Navarro farfán, M. (2019), **Evaluación con cambio climático de escenarios de demanda para las masas subterráneas en los acuíferos asociados al campo geotérmico Cerritos Colorados**, México: U.M.S.N.H.
- Navarro-Avargonzález, A. (12 de enero de 2017). **Conceptos Básicos de Hidrogeología**. Obtenido de Instituto Geominero de España: [http://aguas.igme.es/igme/publica/pdf/for\\_aguas\\_mine/1\\_conceptos.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/pdf/for_aguas_mine/1_conceptos.pdf)
- Puerta-Tuesta, R., Rengifo-Trigozo, J., & Bravo-Morales, N. (2011). **ArcGis Básico 10**. Tingo María, Perú: Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- REPDA, CONAGUA (2020). Consulta de base de datos del Registro Público de Derechos del Agua, Gobierno de México.
- SANDERS, L. & S. J. WEATHCRAFT (1993), **Groundwater Flow**. In: Maidment, D.R. (Ed.): Handbook of Hydrology. McGraw Hill.
- SANDERS, L. (1998), **A manual of field hydrogeology**. Prentice-Hall, 381 pp.
- SINA, CONAGUA, (2018). **Sistema Nacional de Información del Agua**. OBTENIDO DE <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=distritosiego>
- SMITH, L. & S. J. WEATHCRAFT (1993), **Groundwater Flow**. In: Maidment, D.R. (ed.), Handbook of Hydrology. McGraw Hill.





ANEXOS 1

Anexo 1. Valores de k en función del uso y tipo de suelo.

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS		
A	Suelos permeables. Tales como arenas profundas y loess poco compactos.		
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; Terrenos migajosos.		
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas.		
Uso de suelo	Tipo de suelo		
	A	B	C
Barbecheo, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.3
Cultivos:			
En Hilera	0.24	0.27	0.3
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.3
Granos pequeños	0.24	0.27	0.3
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% - Poco	0.14	0.2	0.28
Del 50 a 75% - Regular	0.2	0.24	0.3
Menos del 50% - Excesivo	0.24	0.28	0.3
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.3
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Camino	0.27	0.3	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.3

Anexo 2. Estaciones con buena información meteorológica.

	ID_ESTACIO	NOMBRE	LONG_GRA	LONG_MIN	LAT_GRA	LAT_MIN	ALTITUD
1	11072	SANTA RITA, JARAL DEL P	-101	4	20	4	1783
2	11060	SALVATIERRA, SALVATIERRA	-100	51	20	51	1782
3	11071	SANTA MARIA YURIRIA(DGE)	-101	8	20	8	1761





4	11139	CAMINO BLANCO, JERECUARO	-100	38	20	38	1325
5	11010	CERANO, YURIRIA	-101	23	20	23	1850
6	16104	PURUANDIRO, PURUANDIRO	-101	31	20	31	1994
7	11076	SOLIS, ACAMBARO	-100	40	20	40	1900
8	11158	PINICUARO, MOROLEON	-101	14	20	14	1915
9	11002	ACAMBARO, ACAMBARO	-100	43	20	43	1846
10	11114	EL REFUGIO, ACAMBARO	-100	56	20	56	2070
12	16023	COPANDARO DE GALEANA,	-101	37	19	37	1500
13	16155	COPANDARO, JIMENEZ	-101	5	19	5	1981
14	16057	JIMENEZ, VILLA JIMENEZ	-101	45	19	45	1250
15	16052	HUINGO, ZINAPECUARO	-100	50	19	50	1832
16	16225	VILLA JIMENEZ, V.JIMENEZ	-101	45	19	45	1980
17	16050	HUANIQUEO, HUANIQUEO	-101	30	19	30	1950
18	16100	PUENTE SAN ISIDRO,	-101	32	19	32	1989
19	16116	SAN SEBASTIAN,QUERENDARO	-100	57	19	57	2070
20	16188	TIRINDARO, ZACAPU	-101	44	19	44	383
21	16213	IRIMBO, CIUDAD HIDALGO	-100	30	19	30	2200
22	16020	CIUDAD HIDALGO (DGE)	-100	34	19	34	2020
23	16080	MORELIA, MORELIA (SMN)	-101	11	19	11	1941
24	16235	HUAJUMBARO, CD. HIDALGO	-100	44	19	44	2285
25	16120	SANTIAGO UNDAMEO,MORELIA	-101	18	19	18	2000
26	16258	PRESA TUXPAN, TUXPAN	-100	30	19	30	1770
27	16133	TURICATO, TURICATO	-101	25	19	25	795
28	16146	ZIRAHUEN,VILLA ESCALANTE	-101	45	19	45	1850
29	16049	ETUCUARO, MADERO (SMN)	-101	5	19	5	1612
30	16139	VILLA MADERO, MADERO	-101	16	19	16	2227
31	16245	SAN CARLOS,TIQUICHEO DGE	-100	47	19	47	1890
32	16123	TACAMBARO, TACAMBARO	-101	28	19	28	1755

### 31 ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Anexo 3. Resultados de evapotranspiración en las estaciones meteorológicas

Evt	16123												Latitud
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	19.2
$T_j$	17.7	19.1	19.7	20.6	21.2	19.5	19.0	17.3	17.0	17.9	17.4	15.7	
$K_a$	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.92	
$i_j$	6.77	7.59	7.96	8.53	8.93	7.85	7.53	6.53	6.38	6.87	6.59	5.64	
$I$	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	
$a$	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	
$U_j$	cm	5.91	6.45	7.83	8.70	9.90	8.26	8.05	6.54	5.86	6.32	5.60	4.51
	mm	59.13	64.47	78.29	86.97	98.95	82.60	80.46	65.45	58.59	63.16	55.97	45.09
P(mm)	5.50	12.80	0.00	5.00	37.70	280.80	314.66	356.80	191.50	32.30	42.00	22.50	1301.56





## MODELACIÓN DEL ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO CON MODFLOW

Evr	5.50	12.80	0.00	5.00	37.70	82.60	80.46	65.45	58.59	32.30	42.00	22.50	444.90
-----	------	-------	------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------

Evt	11071												Latitud	
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	20.9	
T <sub>j</sub>	15.85	17.29	19.20	22.26	24.75	23.63	21.73	21.57	21.05	18.44	17.67	15.88		
K <sub>a</sub>	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.12	1.15	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91		
i <sub>j</sub>	5.74	6.54	7.67	9.59	11.26	10.50	9.25	9.15	8.81	7.21	6.76	5.75		
I	98.24	98.24	98.24	98.24	98.24	98.24	98.24	98.24	98.24	98.24	98.24	98.24		
a	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15		
U <sub>j</sub>	cm	4.22	4.83	6.94	9.75	13.19	11.74	10.07	9.63	8.38	6.17	5.23	4.07	
	mm	42.24	48.31	69.44	97.48	131.90	117.41	100.71	96.30	83.85	61.71	52.26	40.70	942.29
P(mm)	8.4	2.4	0.4	1.4	71.1	126.5	174.9	166.4	124.6	22.9	10.2	27.8	737.00	
Evr	8.40	2.40	0.40	1.40	71.10	117.41	100.71	96.30	83.85	22.90	10.20	27.80	542.87	

Evt	16133												Latitud	
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	19.1	
T <sub>j</sub>	22.19	23.88	24.35	25.77	27.06	27.52	26.51	26.70	24.56	23.64	22.47	21.40		
K <sub>a</sub>	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.13	1.11	1.02	1.00	0.93	0.92		
i <sub>j</sub>	9.55	10.67	10.99	11.97	12.89	13.22	12.50	12.63	11.13	10.51	9.73	9.03		
I	134.82	134.82	134.82	134.82	134.82	134.82	134.82	134.82	134.82	134.82	134.82	134.82		
a	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16		
U <sub>j</sub>	cm	7.37	8.77	10.66	12.97	16.26	16.84	15.36	15.32	10.84	9.44	7.50	6.31	
	mm	73.67	87.67	106.60	129.75	162.55	168.39	153.58	153.18	108.43	94.42	74.99	63.09	1376.32
P(mm)	0	7	0	13	39.7	167.4	174.6	297.3	80.9	45	14	25.2	864.10	
Evr	0	7	0	13	39.7	167.4	153.576728	153.175431	80.9	45	14	25.2	698.95	

Evt	16235												Latitud	
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	19.7	
T <sub>j</sub>	10.85	12.07	13.07	14.38	17.37	17.03	16.09	16.63	15.90	13.81	13.24	10.90		
K <sub>a</sub>	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91		
i <sub>j</sub>	3.23	3.80	4.28	4.95	6.59	6.39	5.87	6.17	5.76	4.66	4.37	3.25		
I	59.32	59.32	59.32	59.32	59.32	59.32	59.32	59.32	59.32	59.32	59.32	59.32		
a	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42		
U <sub>j</sub>	cm	3.60	3.96	5.07	5.92	8.33	7.96	7.54	7.70	6.64	5.33	4.67	3.47	
	mm	35.96	39.59	50.73	59.22	83.33	79.58	75.37	76.95	66.41	53.30	46.73	34.70	701.86
P(mm)	13.50	3.00	1.50	43.50	67.00	262.00	283.50	280.50	131.40	11.50	54.00	49.00	1200.40	
Evr	13.50	3.00	1.50	43.50	67.00	79.58	75.37	76.95	66.41	11.50	46.73	34.70	519.74	

Evt	16146												Latitud
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	19.5
T <sub>j</sub>	14.18	14.55	15.08	16.48	18.30	19.44	18.44	18.33	18.65	17.27	16.67	14.34	
K <sub>a</sub>	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91	





MODELACIÓN DEL ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO CON MODFLOW

$i_j$	4.85	5.04	5.32	6.08	7.13	7.81	7.21	7.15	7.34	6.53	6.19	4.93	
I	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	
a	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	
$U_j$	cm	4.43	4.38	5.32	6.30	8.08	8.80	8.26	7.96	7.55	6.50	5.71	4.33
	mm	44.30	43.75	53.17	62.95	80.82	87.95	82.56	79.64	75.50	65.04	57.06	43.33
P(mm)	0.00	62.70	0.00	0.00	79.50	140.00	361.50	329.00	222.10	57.00	98.50	122.00	1472.30
Evtr	0.00	43.75	0.00	0.00	79.50	87.95	82.56	79.64	75.50	57.00	57.06	43.33	606.30

Evt	11002												Latitud
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	20
$T_j$	15.87	16.79	18.68	22.07	22.90	22.70	20.90	20.87	19.93	18.76	17.23	14.60	
$K_a$	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91	
$i_j$	5.75	6.26	7.36	9.47	10.01	9.88	8.72	8.70	8.11	7.40	6.51	5.07	
I	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	87.17	
a	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	
$U_j$	cm	4.78	5.05	7.09	9.94	11.48	11.09	9.72	9.44	7.94	6.94	5.48	3.91
	mm	47.84	50.48	70.86	99.38	114.79	110.88	97.22	94.40	79.43	69.36	54.81	39.06
P(mm)	2.90	7.80	0.00	1.10	118.20	101.40	79.80	191.20	94.90	14.60	64.10	29.20	705.20
Evtr	2.90	7.80	0.00	1.10	114.79	101.40	79.80	94.40	79.43	14.60	54.81	29.20	580.23

Evt	16080												Latitud
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	19.7
$T_j$	18.02	18.63	20.69	21.59	23.35	22.43	20.87	20.81	18.99	18.27	17.54	16.39	
$K_a$	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91	
$i_j$	6.97	7.33	8.59	9.16	10.31	9.70	8.70	8.66	7.54	7.11	6.68	6.03	
I	98.24	98.24	98.24	98.24	98.24	98.24	98.24	98.24	98.24	98.24	98.24	98.24	
a	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	
$U_j$	cm	5.60	5.69	8.15	9.10	11.58	10.43	9.18	8.89	6.72	6.06	5.17	4.38
	mm	55.98	56.89	81.52	91.00	115.79	104.33	91.77	88.85	67.18	60.61	51.69	43.78
P(mm)	4.60	22.30	5.20	12.90	87.00	94.20	146.90	241.43	200.55	16.45	23.62	33.49	888.64
Evtr	4.60	22.30	5.20	12.90	87.00	94.20	91.77	88.85	67.18	16.45	23.62	33.49	547.57

Evt	16155												Latitud
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	19.9
$T_j$	12.60	13.92	17.24	18.19	19.77	18.93	18.01	17.67	17.29	14.27	14.28	13.04	
$K_a$	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91	
$i_j$	4.05	4.71	6.51	7.07	8.02	7.51	6.96	6.76	6.54	4.89	4.90	4.27	
I	134.82	134.82	134.82	134.82	134.82	134.82	134.82	134.82	134.82	134.82	134.82	134.82	
a	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	
$U_j$	cm	1.23	1.59	3.58	4.33	6.05	5.18	4.55	4.17	3.58	1.91	1.79	1.31
	mm	12.28	15.93	35.83	43.25	60.54	51.85	45.49	41.72	35.80	19.15	17.85	13.12
P(mm)	0.00	9.10	0.00	4.20	117.80	159.00	129.50	187.00	102.30	11.00	21.50	47.00	788.40
Evtr	0.00	9.10	0.00	4.20	60.54	51.85	45.49	41.72	35.80	11.00	17.85	13.12	290.68





## MODELACIÓN DEL ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO CON MODFLOW

Evt	16258												Latitud	
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	19.5	
T <sub>j</sub>	15.66	16.71	16.91	17.86	20.09	19.46	18.81	18.94	18.95	17.88	16.68	15.33		
K <sub>a</sub>	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91		
i <sub>j</sub>	5.63	6.21	6.33	6.87	8.21	7.83	7.44	7.51	7.52	6.88	6.19	5.45		
I	59.32	59.32	59.32	59.32	59.32	59.32	59.32	59.32	59.32	59.32	59.32	59.32		
a	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42		
U <sub>j</sub>	cm	6.07	6.29	7.32	8.06	10.24	9.61	9.41	9.25	8.53	7.70	6.50	5.65	
	mm	60.68	62.92	73.20	80.58	102.41	96.13	94.05	92.53	85.28	77.02	64.97	56.48	946.26
P(mm)	16.00	0.00	0.00	15.50	60.00	111.00	135.20	193.05	104.20	16.38	22.03	46.70	720.06	
Evtr	16.00	0.00	0.00	15.50	60.00	96.13	94.05	92.53	85.28	16.38	22.03	46.70	544.59	

Evt	16225												Latitud	
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	19.9	
T <sub>j</sub>	13.49	14.71	16.97	19.02	21.37	20.80	19.25	18.94	18.15	15.64	15.74	13.70		
K <sub>a</sub>	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91		
i <sub>j</sub>	4.49	5.12	6.36	7.56	9.02	8.66	7.70	7.51	7.04	5.62	5.68	4.60		
I	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58		
a	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70		
U <sub>j</sub>	cm	4.06	4.46	6.50	8.03	10.53	9.88	8.90	8.43	7.21	5.49	5.17	4.00	
	mm	40.62	44.55	64.96	80.34	105.32	98.82	88.99	84.31	72.10	54.93	51.66	39.96	826.57
P(mm)	8.60	11.30	11.20	21.80	88.50	122.50	137.30	252.00	141.60	9.20	38.10	38.50	880.60	
Evtr	8.60	11.30	11.20	21.80	88.50	98.82	88.99	84.31	72.10	9.20	38.10	38.50	571.43	

Evt	16052												Latitud	
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	19.9	
T <sub>j</sub>	14.48	15.76	17.37	18.89	21.29	20.67	19.23	19.86	18.97	16.68	16.36	14.22		
K <sub>a</sub>	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91		
i <sub>j</sub>	5.00	5.69	6.59	7.48	8.97	8.57	7.69	8.07	7.53	6.20	6.02	4.87		
I	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58	75.58		
a	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70		
U <sub>j</sub>	cm	4.58	5.01	6.76	7.94	10.47	9.78	8.88	9.14	7.77	6.13	5.52	4.26	
	mm	45.80	50.08	67.58	79.41	104.65	97.78	88.84	91.37	77.71	61.27	55.15	42.56	862.21
P(mm)	13.50	11.10	0.00	13.20	62.30	166.80	176.30	213.70	224.70	13.20	15.30	32.50	942.60	
Evtr	13.50	11.10	0.00	13.20	62.30	97.78	88.84	91.37	77.71	13.20	15.30	32.50	516.80	

Anexo 5. Valores de porosidad y conductividad hidráulica.

Geología	Total	Eficaz
Arcillas	40 a 60	0 a 5
Limos	35 a 50	3 a 19
arenas finas, areas limosas	20 a 50	10 a 28
Arena gruesa o bien clasificada	21 a 50	22 a 35





Grava	24 a 40	13 a 26				
Shale intacta	1 a 10	0.5 a 5				
Shale fracturada/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	0.000005 a 0.01				
			Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Sedimentos	Grava	25 a 2500	100 a 10 <sup>5</sup>	100 a 10 <sup>5</sup>	10 a 1000	
	Grava con arena					
	Arena gruesa	0.1 a 500	0.01 a 1000	1 a 1000	1 a 100	1 a 100
	Arena media	0.1 a 50				
	Arena fina	0.02 a 20			0.01 a 1	0.01 a 1
	Arena arcillosa			0.01 a 100	0.001 a 0.1	0.01 a 1
	silt, loess	10 <sup>-4</sup> a 2	10 <sup>-4</sup> a 1	10 <sup>-4</sup> a 1	0.001 a 0.1	10 <sup>-4</sup> a 1
	Arcilla	10 <sup>-6</sup> a 4*10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-7</sup> a 10 <sup>-3</sup>		10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-3</sup>
	Arcilla marina inalterada	10 <sup>-6</sup> a 2*10 <sup>-4</sup>		10 <sup>-11</sup> a 10 <sup>-7</sup>		
Rocas Sedimentarias	Calizas carstificadas	0.1 a 2000	0.05 a 0.5	0.1 a 1000		0.1 a 10 <sup>7</sup>
	Calizas, dolomías	10 <sup>-4</sup> a 0.5	0.001 a 0.5	10 <sup>-4</sup> a 1		10 <sup>-4</sup> a 1
	Areniscas	3*10 <sup>-5</sup> a 0.5	10 <sup>-5</sup> a 1	10 <sup>-5</sup> a 1		
	Argilitas (siltstone)	10 <sup>-6</sup> a 0.001				
	Pizarras sedimentarias (shale) intactas	10 <sup>8</sup> a 2*10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-8</sup>		10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-8</sup>
	Pizarras sed. (shale) fracturadas/alteradas		10 <sup>-4</sup> a 1			
Rocas cristalinas	Basalto inalterado, sinfracturar		10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-3</sup>			10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-3</sup>
	basalto fracturado/vesicular cuaternario		10 a 1000			0.01 a 10 <sup>6</sup>
	Escorias basálticas		0.001 a 1000			
	Basalto permeable	0.03 a 2000		0.02 a 1000		





Rocas ígneas y metamórficas sin fracturas	$10^{-9}$ 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				

