



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

**POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

**Modelación de la dinámica del agua subterránea del acuífero  
Valle de Celaya**

Tesis que presenta

**Ana Beatriz Rubio Arellano**

Para obtener el grado de

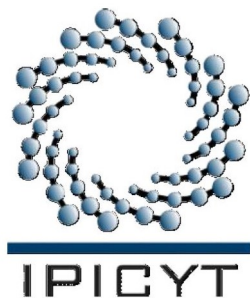
**Maestro en Geociencias Aplicadas**

asesorada por

**Dr. José Alfredo Ramos Leal**

**Dr. Víctor Manuel Vázquez Báez**

San Luis Potosí, S.L.P., Julio 2021



## Constancia de aprobación de la tesis

La tesis **Modelación de la dinámica del agua subterránea del acuífero Valle de Celaya** presentada para obtener el Grado de Maestro(a) en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Ana Beatriz Rubio Arellano** y aprobada el **dd de mm de aaaa** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de **Geociencias Aplicadas** del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

---

Dr. José Alfredo Ramos Leal  
(Director de la tesis)

---

Dr. Víctor Manuel Vázquez Báez  
(Codirector de la tesis)



---

Dra. Berenice Zapata Norberto  
(Asesor de la tesis)

---

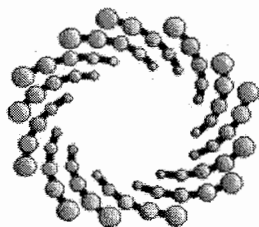
Dr. José Tuxpan Vargas  
(Asesor de la tesis)



## Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la codirección de los doctores José Alfredo Ramos Leal y Víctor Manuel Vázquez Báez.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología con No. de registro 818486 y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



**IPICYT**

# Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

## Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 070 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 13 días del mes de julio del año 2021, se reunió a las 11:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

<b>Dr. José Alfredo Ramos Leal</b>	<b>Presidente</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. José Tuxpan Vargas</b>	<b>Secretario</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dra. Berenice Zapata Norberto</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

**MAESTRA EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

sustentó la C.

**Ana Beatriz Rubio Arellano**

sobre la Tesis intitulada:

*Modelación de la dinámica del agua subterránea del acuífero Valle de Celaya*

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dr. José Alfredo Ramos Leal**  
**Dr. Víctor Manuel Vázquez Báez (BUAP)**

El Jurado, después de deliberar, determinó

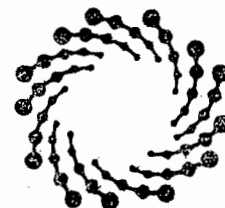
**APROBARLA**

Dándose por terminado el acto a las 12:20 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición de la interesada y para los fines que a la misma convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 13 días del mes de julio de 2021.

**Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez**  
Jefa del Departamento del Posgrado

  
**Dr. Marcial Bonilla Marín**  
Secretario Académico



**IPICYT**  
SECRETARÍA ACADÉMICA  
INSTITUTO POTOSINO DE  
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA  
Y TECNOLÓGICA, A.C.

# Dedicatoria

**Esta tesis está dedicada a mi papá...** la dedico en acto de reconocimiento por tu gran esfuerzo y compromiso con mi vida y con mis metas. Y aunque ya no pudiste acompañarme en este día, todos sabrán que fuiste un maravilloso padre para mí, que siempre alimentó mis sueños y que, gracias a ello, en algunos años tu hija Betty se convertirá en una científica, como tantas veces te lo dije.

**Te amo papá y gracias por ser el mejor padre de todos, estoy segura que siempre estarás conmigo de mil maneras.**

# Agradecimientos

Mi más profundo agradecimiento:

Al Dr. José Alfredo Ramos Leal, por abrirme las puertas y darme la libertad para desarrollar esta investigación, pero sobre todo por compartir sus conocimientos conmigo sin escatimar en lo más mínimo, que agradable ha sido trabajar a su lado.

Al Dr. Víctor Manuel Vázquez Báez por la oportunidad de incluirme en sus proyectos de investigación y que, gracias a ello descubrí que este es el estilo de vida que yo quiero para mí, hoy siento un profundo amor por la ciencia. Gracias por la infinita paciencia y motivarme cuando algo no me salía, las herramientas que me ha dado me han sido útiles para enfrentarme a los nuevos retos que exige la ciencia.

A la Dra. Berenice por haber encendido en mí, la fascinación por la modelación, con usted aprendí en pocos meses cosas extraordinarias que pude aplicar en la realización de esta tesis, sin su ayuda, este trabajo no sería el mismo. Agradezco su entera disposición para ayudarme cuando más lo necesitaba.

Al Dr. José Tuxpan Vargas, por cada una de las recomendaciones hechas en este trabajo, por mostrar siempre su disponibilidad y compartir conmigo sus ideas, ha sido muy agradable haber tenido la oportunidad de compartir el aula de clases, donde me enseñó las bases para llevar a cabo una buena planeación del trabajo científico.

Al resto de la planta académica de la División de Geociencias Aplicadas, cada doctor y doctora que me dio clase dejó en mí, una motivación para seguir en el ámbito científico, mis horizontes trascendieron con los conocimientos que me transmitieron,

ustedes son el reflejo de que nuestro instituto cuenta con investigadores de calidad. Infinitas gracias por alimentar mi alma científica.

Al Institutito Potosino de Investigación Científica y Tecnología A.C., por darme la oportunidad de cursar mis estudios de maestría, todo lo aprendido ha sido la base fundamental para siempre buscar una respuesta a lo incierto y ser crítica cuando la ocasión lo requiere. Desde la licenciatura tenía el sueño de pertenecer al instituto y se cumplió, hoy más que nunca estoy agradecida por forjar mi camino al mundo de la investigación.

Y por último agradezco infinitamente a mi familia, a mis padres que siempre me dieron la libertad de elegir y forjar mi camino, mamá y papá ustedes son la base de todos mis éxitos, gracias por acompañarme siempre en este camino. Hermana, agradezco que siempre estés para mí, eres una pieza fundamental en mi vida.

# Índice general

Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Lista de figuras	xi
Resumen	xvii
Abstract	xix
Introducción	xxi
Planteamiento del Problema	xxiii
Objetivos	xxiv
Justificación	xxv
Antecedentes	xxvi
1. Zona de Estudio	1
1.0.1. Vías de Comunicación . . . . .	2

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	IX
1.0.2. Fisiografía . . . . .	3
1.0.3. Hidrología Regional . . . . .	5
1.0.4. Climatología . . . . .	5
1.0.5. Uso de Suelo y Vegetación . . . . .	8
1.0.6. Edafología . . . . .	9
1.1. Marco Geológico . . . . .	10
1.1.1. Geología estructural . . . . .	15
1.2. Modelo Hidrogeológico . . . . .	17
1.2.1. Tipo de acuífero . . . . .	18
1.2.2. Modelo Hidrogeológico . . . . .	18
1.2.3. Evolución del Nivel Estático . . . . .	28
1.3. Balance de aguas subterráneas . . . . .	30
1.3.1. Entradas . . . . .	31
1.3.2. Salidas . . . . .	35
1.3.3. Coeficiente de almacenamiento . . . . .	37
1.4. Solución a la ecuación de balance . . . . .	38
<b>2. Modelo numérico</b>	<b>42</b>
2.1. Diseño del modelo matemático . . . . .	43
2.2. Método de Diferencias Finitas FDM . . . . .	46
2.2.1. Serie de Taylor de Primer Orden . . . . .	47
2.2.2. Ecuación en Diferencias Finitas . . . . .	48



<i>ÍNDICE GENERAL</i>	x
2.3. Modelación Matemática con MODFLOW . . . . .	51
2.3.1. Discretización espacial y temporal . . . . .	52
2.3.2. Geometría del acuífero . . . . .	53
2.3.3. Condiciones iniciales y de frontera . . . . .	54
2.3.4. Parámetros Hidrogeológicos . . . . .	55
2.3.5. Calibración en estado Estacionario . . . . .	56
2.3.6. Calibración en estado Transitorio . . . . .	62
2.3.7. Análisis de Sensibilidad . . . . .	72
<b>3. Resultados</b>	<b>75</b>
3.1. Proyección de Escenarios de Explotación . . . . .	75
3.2. Escenario 1: Tendencial . . . . .	77
3.2.1. Temporada de Secas . . . . .	77
3.2.2. Temporada de Lluvias . . . . .	79
3.3. Escenario 2: Aumento de bombeo . . . . .	81
3.3.1. Temporada de Secas . . . . .	81
3.3.2. Temporada de Lluvias . . . . .	83
3.4. Escenario 3: Reducción de bombeo . . . . .	85
3.4.1. Temporada de Secas . . . . .	85
3.4.2. Temporada de Lluvias . . . . .	87
3.5. Análisis general de los escenarios de simulación . . . . .	88
<b>4. Conclusiones</b>	<b>90</b>

# Índice de figuras

1.1. Localización del acuífero Valle de Celaya. . . . .	2
1.2. Vías de comunicación en el acuífero Valle de Celaya. . . . .	3
1.3. Provincias Fisiográficas. . . . .	4
1.4. Climas en el acuífero Valle de Celaya de acuerdo a la clasificación de Koppen. . . . .	7
1.5. Distribución de precipitación y temperatura en el acuífero Valle de Celaya. . . . .	8
1.6. Uso de Suelo y Vegetación en el acuífero Valle de Celaya. . . . .	9
1.7. Edafología en el acuífero Valle de Celaya. . . . .	10
1.8. Mapa Geológico del Valle de Celaya . . . . .	12
1.9. Este mapa fue tomado de [21]. Sistemas de fallas en el centro de México. SLP-SH: sistema San Luis de La Paz-Salinas Hidalgo. Las fallas fueron obtenidas de los trabajos cartográficos publicados por el Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (Labarthe-Hernández et al., 1982 y Tristán- González, 1986 entre otros), Nieto-Samaniego et al. (1999b-1999c), Suter et al. (2001) y compilados en Alaniz-Álvarez et al. (2001). En líneas gruesas grises se marcan las fallas que pertenecen al SFTSMA. . . . .	16
1.10. Cortes del Modelo Hidrogeológico. . . . .	19
1.11. Temporada de Secas: Profundidad del nivel estático en el año 2015. . . . .	21

1.12. Temporada de Secas: Elevación del nivel estático en el año 2019. . . . .	22
1.13. Temporada de Secas: Profundidad del nivel estático en el año 2019. . . . .	23
1.14. Temporada de Secas: Elevación del nivel estático en el año 2019. . . . .	24
1.15. Temporada de Lluvias: Profundidad del nivel estático en el año 2010. . . . .	25
1.16. Temporada de Lluvias: Elevación del nivel estático en el año 2010. . . . .	26
1.17. Temporada de Lluvias: Profundidad del nivel estático en el año 2015. . . . .	27
1.18. Temporada de Lluvias: Elevación del nivel estático en el año 2015. . . . .	28
1.19. Temporada de Secas: Evolución del nivel estático 2015 – 2019 . . . . .	29
1.20. Temporada de Lluvias: Evolución del nivel estático 2010 – 2015 . . . . .	30
1.21. Configuración de las celdas de flujo subterráneo. . . . .	32
1.22. Usos del agua en el acuífero Valle de Celaya . . . . .	36
2.1. Esquema de Diferencias Centradas . . . . .	47
2.2. Flujo hacia la celda $i,j,k$ desde la celda $i,j-1,k$ (Modificado de McDonald y Harbaugh, 1988 [34]). . . . .	49
2.3. Discretización espacial, vista en planta del modelo. . . . .	52
2.4. Dirección del flujo natural del Acuífero Valle de Celaya. . . . .	55
2.5. Cargas hidráulicas en Estado Estacionario de la temporada de Secas, donde la mayor carga se representa por el color rojo y la menor carga por el azul oscuro. . . . .	57
2.6. Calibración en estado Estacionario de la temporada de Secas. . . . .	58
2.7. Comparación entre las líneas equipotenciales de los niveles piezométricos calculados por el modelo (Color Rosa) y los medidos en campo (Color Verde) de la temporada de Secas. . . . .	59
2.8. Calibración en estado Estacionario: Temporada de Lluvias . . . . .	60

2.9. Cargas hidráulicas en Estado Estacionario de la temporada de Lluvias, donde la mayor carga se representa por el color rojo y la menor carga por el azul oscuro. . . . .	61
2.10. Comparación entre las líneas equipotenciales de los niveles piezométricos calculados por el modelo (Color Rosa) y los medidos en campo (Color Verde) de la temporada de Lluvias. . . . .	61
2.11. Valores de las cargas hidráulicas en estado transitorio en el intervalo de tiempo 2015-2019. . . . .	63
2.12. Comparación entre líneas equipotenciales de elevación de nivel estático en Temporada de Secas, 2019. . . . .	64
2.13. Correlación de los niveles piezométricos observados y calculados en Temporada de Secas, 2019. . . . .	65
2.14. Residuos de los niveles piezométricos observados y calculados en Temporada de Secas, 2019. . . . .	66
2.15. Temporada de Secas: desviación estándar de los datos calculados por el modelo a partir de la media, la $\pm$ desviación estándar corresponde a las líneas azules, $\pm 2$ desviaciones estándar son las líneas rojas y la media está indicada por la línea color verde. . . . .	67
2.16. Comparación entre líneas equipotenciales de elevación de nivel estático en Temporada de Lluvias, 2015. . . . .	69
2.17. Valores de las cargas hidráulicas en estado transitorio en el intervalo de tiempo 2010-2015. . . . .	70
2.18. Correlación de los niveles piezométricos observados y calculados en Temporada de Lluvias, 2015. . . . .	70
2.19. Residuos de los niveles piezométricos observados y calculados en Temporada de Secas, 2019. . . . .	71

2.20. Temporada de Lluvias: desviación estándar de los datos calculados por el modelo a partir de la media, la $\pm$ desviación estándar corresponde a las líneas azules, $\pm 2$ desviaciones estándar son las líneas rojas y la media está indicada por la línea color verde. . . . .	72
2.21. Análisis de sensibilidad para los parámetros de Recarga, Conductividad hidráulica K, Coeficiente de Almacenamiento específico Ss y Rendimiento Específico Sy. . . .	74
3.1. Elevación de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Tendencial en la Temporada de Secas. . . . .	77
3.2. Isolíneas de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Tendencial en la Temporada de Secas. . . . .	78
3.3. Variación de la carga hidráulica en el escenario Tendencial de la Temporada de Secas. . . . .	79
3.4. Elevación de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Tendencial en la Temporada de Lluvias. . . . .	80
3.5. Isolíneas de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Tendencial en la Temporada de Secas. . . . .	80
3.6. Elevación de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Aumento de Bombeo en la Temporada de Secas. . . . .	81
3.7. Isolíneas de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Aumento de Bombeo en la Temporada de Secas. . . . .	82
3.8. Variación de la carga hidráulica en el escenario Aumento de Bombeo de la Temporada de Secas. . . . .	83
3.9. Elevación de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Aumento de Bombeo en la Temporada de Lluvias. . . . .	84

3.10. Isolíneas de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Aumento de Bombeo en la Temporada de Lluvias. . . . .	84
3.11. Elevación de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Reducción de Bombeo en la Temporada de Secas. . . . .	85
3.12. Isolíneas de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Reducción de Bombeo en la Temporada de Secas. . . . .	86
3.13. Variación de la carga hidráulica en el escenario Reducción de bombeo de la Temporada de Secas. . . . .	86
3.14. Elevación de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Reducción de Bombeo en la Temporada de Secas. . . . .	87
3.15. Isolíneas de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Reducción de Bombeo en la Temporada de Secas. . . . .	88

# Índice de cuadros

1.1. Variables para el cálculo de balance de agua subterránea en el acuífero Valle de Celaya en la Temporada de Secas. . . . .	40
1.2. Variables para el cálculo de balance de agua subterránea en el acuífero Valle de Celaya en la Temporada de Lluvias. . . . .	41
2.1. Porcentaje de error para la calibración en Estado Estacionario de la temporada de Secas. . . . .	57
2.2. Porcentaje de error para la calibración en Estado Estacionario de la temporada de Lluvias. . . . .	60

# Resumen

Se propone un modelo de simulación hidrodinámica para conocer el funcionamiento piezométrico del acuífero Valle de Celaya, a través de Model-Muse y MODFLOW 2005. El acuífero se encuentra en el extremo oriental del estado de Guanajuato y al límite del estado de Querétaro, además se ubica en la región Hidrológica RH No.12 (Lerma-Santiago) y sobre el distrito de riego No.085 (La Begoña).

Los rasgos morfológicos de la zona de estudio sugieren la presencia de cerros con forma cómica y estructuras volcánicas, en términos generales el relieve presenta tres escenarios, desde planicies de relleno, y sierras de baja altitud, hasta estructuras volcánicas extensas y de baja pendiente.

Actualmente, la Comisión Estatal de Agua de Guanajuato(CEAG), junto con la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA), se han encargado de monitorear al acuífero Valle de Celaya mediante pruebas de campo que incluyen levantamientos geológicos, prospección geofísica y medición del nivel piezométrico en todo el acuífero, además, utilizan modelos matemáticos para analizar y evaluar la relación estímulo-respuesta del sistema de agua; sin embargo, los modelos no se encuentran actualizados y por tanto, no están disponibles para tomar decisiones con respecto a la gestión hídrica.

El modelo propuesto reproduce, en condiciones transitorias, el funcionamiento del acuífero de la temporada de secas (marzo-mayo) desde 2015 a 2019 y la temporada de lluvias (junio- agosto)de 2010 a 2015, asimismo, se proyectó la simulación por 11 años más, es decir, hasta el año 2030 y se propusieron tres diferentes escenarios de simulación: tendencial, reducción de bombeo y aumento de bombeo.



El escenario tendencial muestra, que de seguir en las mismas condiciones, el acuífero a largo plazo ya no será sustentable porque los niveles de agua disminuyen considerablemente año con año. Por otro lado, el escenario de aumento de bombeo señala una situación desfavorable porque se generan grandes abatimientos a lo largo de todo el acuífero, y eso traerá como consecuencia el agotamiento total del recurso. Mientras que la reducción de bombeo nos indicó que el acuífero presenta signos de recuperación al disminuir las extracciones por esta actividad al 50 %, este escenario es el más favorable para el acuífero.

En términos generales, el modelo reproduce de manera adecuada las condiciones naturales del acuífero, y con ello se puede concluir que las extracciones masivas de agua por bombeo han provocado la sobre-explotación de este sistema, no obstante, es necesario seguir tomando medidas para la preservación del agua, de igual manera, se sugiere seguir monitoreando los niveles piezométricos del acuífero para poder actualizar el modelo en función de la disponibilidad de datos.

# Abstract

We propose a hydrodynamic simulation model to know the piezometric operation of the Celaya Valley aquifer; we use MODFLOW 2005 and the Model Muse graphic interface. The aquifer is located at the east of Guanajuato State and on the edge of the state of Querétaro; also, the aquifer belongs to the hydrological region RH No.12 (Lerma - Santiago).

The morphological features of the study area suggest the presence of hills with a dome shape and volcanic structures; in general terms, the geographical relief presents three scenarios: fill plains, low altitude mountain ranges, and extensive volcanic structures of low slop.

At the moment, the State Water Commission of Guanajuato (CEAG for its acronym in Spanish), together with the National Water Commission (CONAGUA for its acronym in Spanish), are the government agencies in charge of monitoring the Valley Celaya aquifer through field tests that include geological surveys, geophysical prospecting, and measurement of the piezometric level throughout the aquifer, they also use mathematical models to analyze and evaluate the stimulus-response relationship of the system; however, their models are not updated; therefore, they are not available to make decisions regarding water management.

The proposed model reproduces, in transitory conditions, the functioning of the aquifer in the dry season (this season includes the months' March-May) from 2015 to 2019 and the rainy season (June - August) from 2010 to 2015, in addition, the simulation was projected for the two seasons for eleven years, that is, until the year

2030 and three different simulation scenarios were proposed: trend, pump reduction, and pump increase.

The scenario trend shows that if it continues in the same conditions, the aquifer will no longer be sustainable in the long term because the water levels will drop each year considerably. On the other hand, the scenario of pump increase signals an unfavorable situation because large abatements are generated throughout the entire aquifer, resulting in the total depletion of the resource. While the reduction in pumping indicated that the aquifer shows signs of recovery by reducing withdrawals by this activity to 50 %, this scenario is the most favorable for the aquifer.

In general terms, the model adequately reproduces the natural conditions of the aquifer, and with it, we can be concluded that the massive pumping of water has caused the over-exploitation of this system; nevertheless, it is necessary to continue taking measures for the preservation of water; similarly, it is suggested to continue monitoring the aquifer piezometric levels to update the model based on data availability.

# Introducción

Los modelos matemáticos utilizados en el monitoreo de aguas subterráneas consisten en un conjunto de Ecuaciones Diferenciales Parciales (PDE's), para resolver estas PDE's se requiere conocer la geometría del acuífero, los parámetros hidráulicos y las condiciones iniciales y de frontera.

Generalmente los problemas relacionados con el flujo subterráneo de acuíferos no proporcionan soluciones exactas a causa de la no linealidad, ya sea en los parámetros o en las condiciones de frontera [1], por ello, se recurre a la búsqueda de soluciones aproximadas a través de los métodos numéricos. Para encontrar la solución por medio de los métodos numéricos es necesario remplazar la Ecuación Diferencial básica que describe el sistema de flujo por un conjunto de ecuaciones algebraicas que suelen resolverse con ayuda de un equipo de cómputo. Los métodos numéricos más utilizados son el Método de Elementos Finitos (FEM), el Método de Diferencias Finitas (FDM) y el Método de Volúmenes Finitos.

En este trabajo se realiza la modelación del acuífero Valle de Celaya, Guanajuato, a través de Modflow-2005, para dicha modelación se diseña un modelo hidrogeológico conceptual a partir de la recolección de información en reportes técnicos de la CONAGUA y de la CEAG, además de otras investigaciones ya antes realizadas en la zona de estudio. La piezometría fue proporcionada por la Comisión Estatal de Agua en Guanajuato, en dos bases de datos: temporada de secas y de lluvias. Con la integración de esta información se construyó un modelo de flujo del agua subterránea del Valle de Celaya y se realizaron proyecciones para auxiliar la toma de decisiones con relación a la gestión hídrica adecuada del sistema.

En el Capítulo 1 se presentan las características de la zona de estudio, el marco geológico, el diseño del modelo hidrogeológico conceptual y el cálculo de los parámetros involucrados en el balance hídrico del acuífero. El Capítulo 2 aborda todo lo relacionado con el modelo numérico, desde la estructuración del diseño matemático hasta la Calibración del modelo en estado estacionario y transitorio. El Capítulo 3 incluye los resultados de las proyecciones realizadas con los diferentes escenarios de explotación y finalmente en el Capítulo 4 se presentan las conclusiones generales y las recomendaciones de la investigación.

# Planteamiento del Problema

El agua impulsa el desarrollo social, humano y la economía de toda la población mundial, el dotar de los servicios hidráulicos es un gran compromiso, ya que estos juegan un papel de primera necesidad para el desarrollo en nuestro país, estado y municipios. Por ello, es importante resguardar el uso adecuado de nuestros recursos hídricos.

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas ONU [2], se estima que, dentro de un par de años, aproximadamente el 60 % de la población mundial vivirá en ciudades, lo cual obligará a todo el orbe a enfrentar grandes retos relacionados con el abastecimiento de agua potable para diversos sectores, principalmente el Agrícola, Público, Urbano e Industrial, lo que provocará una alta demanda de agua particularmente en aquellas regiones que enfrentan escases o que no tienen acceso a este líquido.

El Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), reporta que el estado de Guanajuato cuenta con 18 acuíferos distribuidos en su territorio, para el año 2020 la CONAGUA reportó a 11 de ellos en estado de sobreexplotación, entre ellos, el acuífero Valle de Celaya.

Sumado a la sobreexplotación presente en este acuífero, la importancia de su estudio y monitoreo radica en que el agua subterránea contenida en este cuerpo rocoso es utilizada para abastecer el agua potable de más de nueve municipios aledaños al acuífero, además, es el segundo acuífero del estado de Guanajuato, con mayor requerimiento de agua para uso agrícola, lo cual quiere decir, que, en un futuro cercano, el crecimiento poblacional exigirá mayor demanda de extracciones de agua, generando de esta manera estrés hídrico en la región [2].

# Objetivos

## Objetivo General

- Realizar el análisis cualitativo y cuantitativo de la dinámica de flujo subterráneo del acuífero Valle de Celaya a partir de la modelación matemática y computacional, con el fin de elaborar medidas adecuadas para su correcta explotación.

## Objetivos Específicos y Metas

- Unificar la información teórica y práctica para el entendimiento y construcción del modelo conceptual del acuífero Valle de Celaya.
- Utilizar el algoritmo de MODFLOW y la interfaz gráfica de ModelMuse para la solución a la ecuación de flujo subterráneo en 3D y elaborar un modelo numérico del Valle de Celaya.
- Proporcionar pronósticos del agua subterránea en el acuífero Valle de Celaya a través de diferentes escenarios de simulación.

# Justificación

En esta última década los estudios hidrogeológicos enfocados al aprovechamiento y gestión eficiente del agua subterránea se han sustentado en la modelación matemática y computacional, puesto que estas herramientas son útiles para el análisis cualitativo y cuantitativo en el monitoreo de cuerpos de agua subterráneos, además, permiten generar, a bajo costo, escenarios hídricos futuros del acuífero para detectar los posibles cambios en el comportamiento de las variaciones del recurso hídrico, y de esta manera, apoyar la toma de decisiones, en cualquier instante de tiempo, con respecto a una gestión hídrica eficiente. Por otro lado, según la Asociación Geohidrogeológica Mexicana, el acuífero Valle de Celaya tardó en constituirse aproximadamente 100 millones de años [4] y en cuatro décadas y media, este acuífero ha mostrado abatimientos considerables, de ahí proviene la importancia de monitorear este acuífero.



# Antecedentes

- Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Celaya (1115), Estado de Guanajuato. Publicado el 4 de enero de 2018 por la Comisión Nacional del Agua. El objetivo principal de este estudio consistió en presentar los resultados técnicos sintetizados del balance y disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar en el acuífero Valle de Celaya [5].
- Modelo numérico del flujo de agua subterránea para la cuenca de Celaya. Publicado en enero de 2017 por Jorge López Alvis (UNAM). El objetivo principal consiste en desarrollar un modelo numérico de flujo de agua subterránea que represente la dinámica del sistema real. De igual forma, el modelo presenta el comportamiento del sistema ante distintos escenarios de explotación a futuro [6].
- Estimación de la sobreexplotación producida en el acuífero Valle de Celaya (México). Publicado el 8 de abril de 2017 por el Colegio de Postgraduados (COLPOS). El objetivo principal de la investigación consistió en estimar el grado de sobreexplotación del acuífero por dos métodos: Método del balance hidrológico y Método de evolución de niveles de agua para el año 2013. Además, el estudio da a conocer algunas recomendaciones para la reducción de la sobreexplotación en el acuífero y para la modificación del sector agrícola en la adquisición del agua extraída del acuífero [7].
- Actualización Hidrogeológica del Acuífero Valle de Celaya. Análisis y determinación por concentraciones de Arsénico; propuesta del sitio para la perforación de un pozo de adsorción. Publicado en el año 2016 por Blanca Sofía Amézaga

Campos (UNAM). El objetivo central de la investigación se fija en la actualización de las características litológicas, estructurales e hidrogeológicas del acuífero Valle de Celaya, Gto. El estudio también da a conocer una actualización del marco conceptual del funcionamiento hidrogeológico y las causas de la deformación piezométrica en el acuífero [8].

- Sinopsis: Seguimiento del estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Valle de Celaya, Gto. Publicado en septiembre de 2002 y elaborado por Lesser y Asociados, S.A de C.V, para la Comisión del Agua en Guanajuato. Los objetivos fundamentales del estudio fueron: a) Conocer las características bajo las cuales se extrae el agua subterránea de los acuíferos; b) Elaborar un balance del agua subterránea actualizado (hasta el año 2000); c) Conocer la existencia de comunicación entre acuíferos. El estudio presenta el déficit y volúmenes de extracción de agua en el acuífero [9].
- Estudio Hidrológico del Estado de Guanajuato. Publicado el 13 de agosto de 1998 por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática INEGI. El objetivo central del estudio se basó en proponer nuevas estrategias para dar una utilización más intensa a los almacenamientos de agua en nuevas zonas agrícolas y de uso pecuario en el estado de Guanajuato, sobre todo en las cuencas que presentan precipitaciones altas. El estudio centra una parte muy importante en la descripción de la zona Geohidrológica y la constitución Geológica del acuífero, esto con el fin de englobar la información de este acuífero con el resto de los demás acuíferos [10].
- Efectos de cambio de uso de suelo sobre un acuífero en una región tectónica activa. Publicado en octubre de 2012 por Simón Eduardo Carranco Lozada (IPICYT). Uno de los objetivos principales de la tesis consistió en el reconocimiento de los efectos del cambio del uso del suelo sobre el acuífero Valle de Celaya, donde se reconoce que la extracción intensiva de agua subterránea, principalmente en la zona Urbana, provoca que el cambio de abatimiento interseque las fallas y haya dislocamientos en todo el centro de Celaya [11].

- Desarrollo de una metodología para la estimación de la componente horizontal en la deformación del terreno: Caso Ciudad de Celaya. Publicado en mayo de 2019 por Simón Eduardo Carranco Lozada (IPICYT). El objetivo central de la investigación consistió en predecir, a través de un modelo con base a mediciones GPS y análisis de imágenes DinSAR, la evolución de la deformación del Valle de Celaya. En este trabajo se reconoce la deformación del terreno por las extracciones de agua subterránea, lo cual provoca grandes afectaciones a diversas ciudades, especialmente en la ciudad de Celaya [12].

# Capítulo 1

## Zona de Estudio

El acuífero Valle de Celaya se define con la clave 1115 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de Aguas Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en el extremo oriental del estado de Guanajuato, en el límite con el estado de Querétaro, entre los paralelos 20°20' y 20°53' de latitud norte y los meridianos 100°28' y 101°06' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 2,817.19 km<sup>2</sup> de acuerdo con la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato.

Este acuífero limita al norte con los acuíferos Cuenca Alta del Río Laja y San Miguel de Allende, al oeste con el acuífero Irapuato-Valle, al este con el acuífero Valle de Querétaro, al sureste con el acuífero Valle de La Cuevita, al sur con el acuífero Salvatierra-Acámbaro y al suroeste con el acuífero Ciénega Prieta-Moroleón.

Geopolíticamente, el acuífero cubre la totalidad de los municipios Comonfort, Apaseo El Grande, Celaya, Villagrán, Juventino Rosas, Cortázar, Apaseo El Alto y Jaral del Progreso; además, los principales usuarios de aguas subterráneas son los sistemas de agua potable ubicados en estos municipios. Este acuífero también se encuentra el Distrito de Riego N° 85 “La Begoña”, ubicado en el municipio de San Miguel de Allende, donde también se localiza la presa Ignacio Allende, con una capacidad total de 251 Mm<sup>3</sup>, la cual es alimentada por el río La Laja, con un escurrimiento medio anual de 192 Mm<sup>3</sup>.

La zona de estudio se puede visualizar en la Figura 1.1, además, se estimó la precipitación y evaporación media en el acuífero, dando valores de 623.38 mm/año y 1,963 mm/año, respectivamente, y temperatura ambiente de 18.6°C.

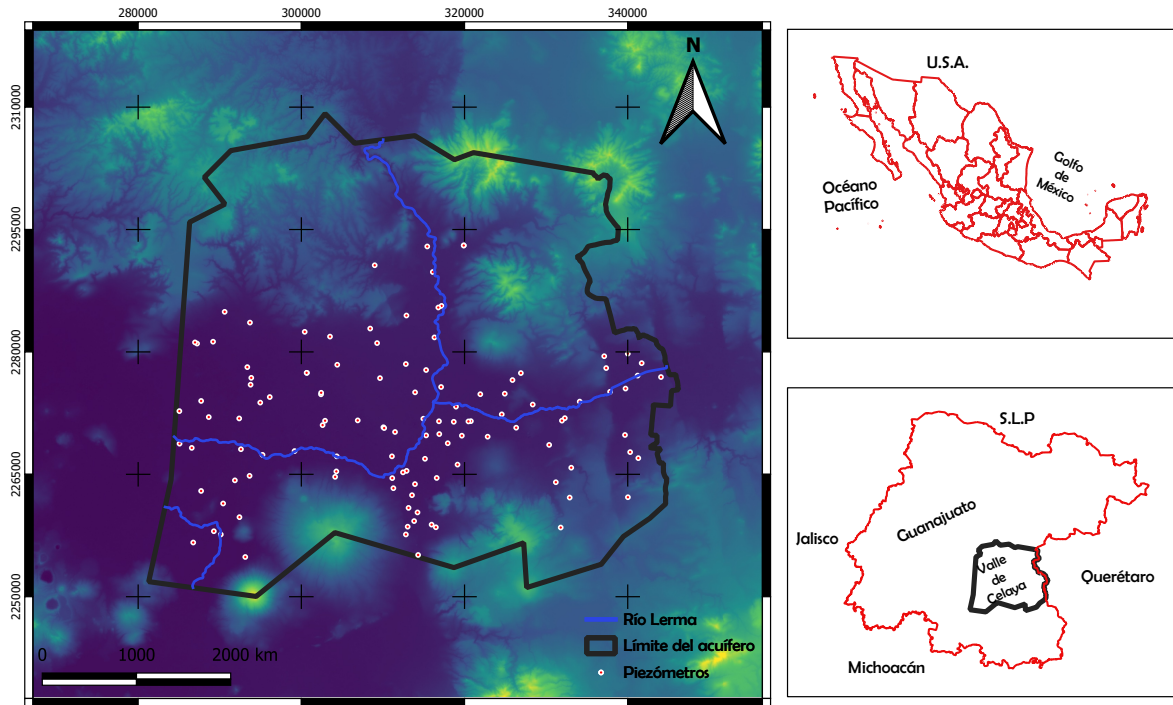


Figura 1.1: Localización del acuífero Valle de Celaya.

### 1.0.1. Vías de Comunicación

El área de estudio se encuentra entre una red de carreteras Federales y Estatales, así como con caminos secundarios que comunican los poblados de la zona. La carretera Federal de primer orden No. 45, comunica a la ciudad de México con Querétaro y Celaya, mientras que la carretera Federal de segundo orden No. 45, une a Celaya, Cortázar y Salamanca. La carretera Estatal No. 51, comunica la ciudad de Celaya con San José de Guanajuato (Figura 1.2); el aeropuerto más cercano es el de Querétaro.

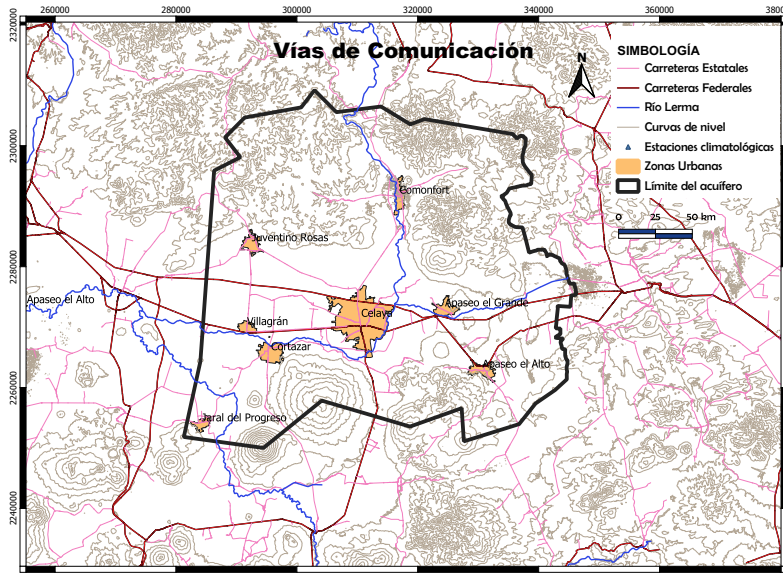


Figura 1.2: Vías de comunicación en el acuífero Valle de Celaya.

## 1.0.2. Fisiografía

El estado de Guanajuato se localiza dentro de tres provincias fisiográficas, la parte norte y central del estado pertenecen a la provincia fisiográfica Mesa del Centro, la porción noreste, a la provincia Sierra Madre Oriental y la porción centro-sur del estado, al eje Neovolcánico (Figura 1.3). La mayor parte de la zona de estudio se centra en la provincia geológico-fisiográfica del eje Neovolcánico y una pequeña parte al noroeste se ubica en la Mesa del Centro, de acuerdo al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

La provincia Mesa del centro, es en su mayor parte plana, se caracteriza por sus llanuras extensas que se encuentran interrumpidas por sierras, También esta limitada por dos grandes sierras de México: la oriental y la occidental; las llanuras de mayor extensión se localizan en la zona de Ojuelos, en el estado de Jalisco y la zona con mayor presencia de sierras en los Altos de Guanajuato, parte de San Luis Potosí y Zacatecas. La altitud promedio de esta provincia es de 1700 a 2300 m, mientras que las mayores elevaciones llegan a 2500 m de altitud en la Sierra de Guanajuato [13].

La provincia del Eje Neovolcánico también conocida como Sierra Volcánica Transversal, es una provincias con grandes variaciones en el relieve y en los tipos de roca. Se extiende desde el océano Pacífico hasta el Golfo de México, constituyendo una ancha faja de aproximadamente 130 km [13]. Esta provincia fisiográfica está caracterizada por el predominio de derrames basálticos, numerosos volcanes y lagos, cuya morfología, orientación y distribución sugiere estar situado en fosas tectónicas. También se encuentran diversos lagos formados en depresiones causadas por fallas, generalmente gravens, así como por el carácter volcánico de la región que propició el cierre de cuencas hidrográficas y la acumulación de aguas superficiales que dieron origen a numerosos lagos: Chapala, Cuitzeo y Yuriria. De la misma forma, se encuentran depresiones con orientación norte-sur, en forma de gravens. Otra de las características de esta provincia es la existencia de numerosos aparatos volcánicos que se encuentran desde el este hasta la parte oriental de la provincia, representado por volcanes como Iztaccíhuatl, Popocatépetl, Pico de Orizaba, Cofre de Perote y Malinche.

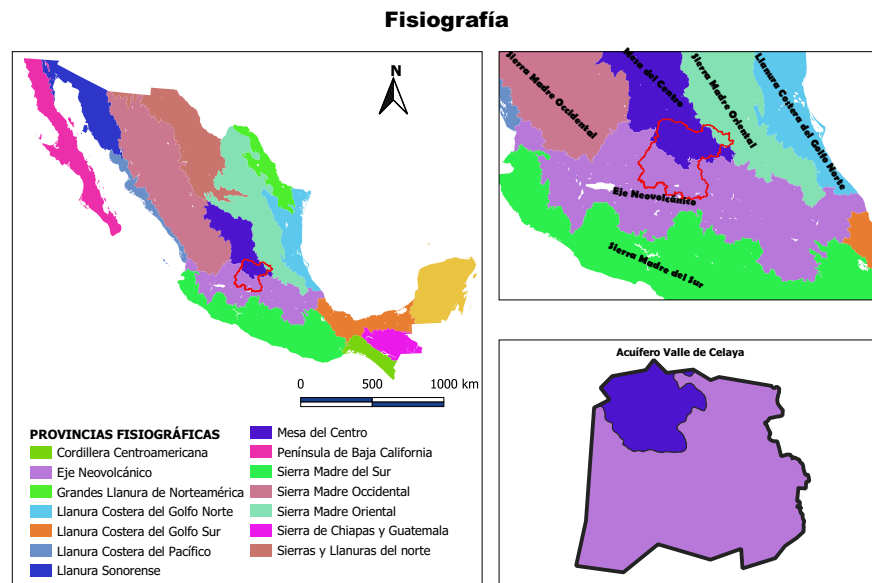


Figura 1.3: Provincias Fisiográficas.

### 1.0.3. Hidrología Regional

El acuífero Valle de Celaya se ubica en la Región Hidrológica RH N° 12 “Lerma-Santiago”, Subregión Hidrológica “La Laja”, en la cuenca Río Lerma-Salamanca, subcuenca Pericos; en ella se localiza el Distrito de Riego No. 085, “La Begoña”, que aprovecha los escurrimientos del Río La Laja, controlados por la presa Ignacio Allende, ubicada fuera del límite del acuífero, en las inmediaciones de San Miguel de Allende.

Las principales corrientes superficiales que drenan el área de estudio son: el Río Laja, que cuenta con un área de captación de 7,958 km<sup>2</sup> y corresponde al límite oriental del área de estudio, recibe como afluentes al Río Querétaro y al Arroyo Nautla. El Río Laja desemboca al Río Lerma, el cual circula en el extremo sur de la zona de estudio, donde sus escurrimientos continúan hacia el poniente para más adelante desembocar en la Laguna Chapala.

### 1.0.4. Climatología

De acuerdo con el Sistema Nacional de Información Sobre Biodiversidad (SNIB) [14], en la ubicación del área cubierta por el acuífero Valle de Celaya se identifican varios climas que van del semicálido-subhúmedo hasta el semiarido-semicálido, el más predominante en la zona de estudio es el semicálido-subhúmedo con lluvias en verano de acuerdo a la clasificación de Köppen [15]. En la Figura 1.4 se pueden observar los diferentes climas predominantes en el acuífero Valle de Celaya.

Por su cobertura espacial el más importante es el (A)C(w0) que cubre el 46.6 % de la zona de estudio, esta clasificación corresponde a un clima semicálido subhúmedo de tipo menos húmedo, con régimen de lluvias de verano y lluvias máximas que se registran en el periodo mayo-octubre, mientras que la precipitación del mes más seco es menor a 40 mm y el porcentaje de lluvia invernal del 5 % al 10.2 % del total anual. Presenta una temperatura media anual mayor a 18°C, mientras que la temperatura del mes más frío es menor a 18°C y la temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.



El 24.9 % del área cubierta por el acuífero presenta un clima semiárido, semicálido BS1hw, con régimen de lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 % al 10.2 % del total anual, precipitación media anual que varía de 500 a 700 mm. La temperatura media anual es mayor a 18°C, la temperatura del mes más frío menor a 18°C y la temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.

El clima C(w0) se presenta cubriendo un 13.4 % del acuífero, corresponde a clima templado, subhúmedo, de tipo menos húmedo, con régimen de lluvias de verano y lluvias máximas que se registran en el periodo mayo-octubre, mientras que la precipitación del mes más seco es menor de 40 mm; el porcentaje de lluvia invernal del 5 % al 10.2 % del total anual. La temperatura media anual es de entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.

El 12.5 % de la zona de estudio presenta clima de tipo templado, subhúmedo C(w1), con precipitación en el mes más seco menor a 40 mm y porcentaje de lluvia invernal del 5 % al 10.2 % del total anual. La temperatura media anual es de entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.

Por último, el clima (A)C(w1) cubre un total del 2.6 % del área de estudio, el clima es de tipo semicálido subhúmedo del grupo menos húmedo, y precipitación del mes más seco menor a 40 mm y un porcentaje de lluvia invernal del 5 % al 10.2 % anual. La temperatura media anual es mayor a 18°C, la temperatura del mes más frío menor de 18°C, y la temperatura del mes más caliente es mayor a 22°C.

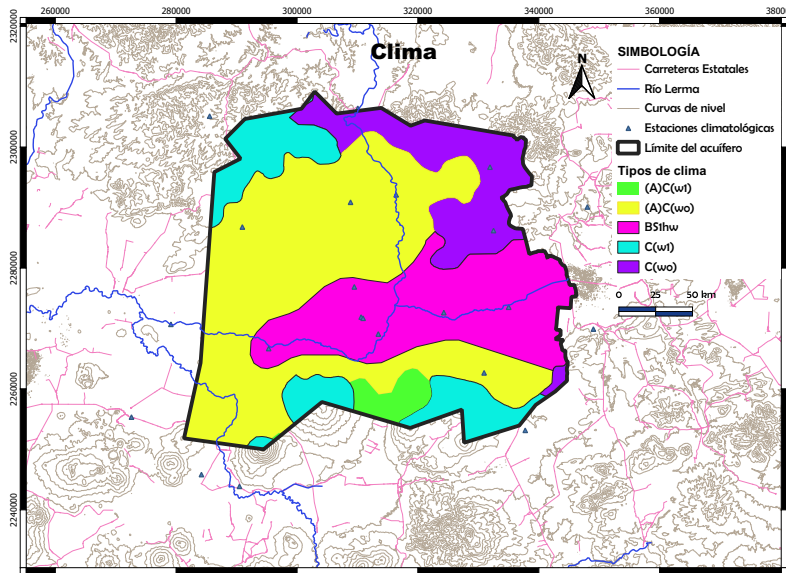
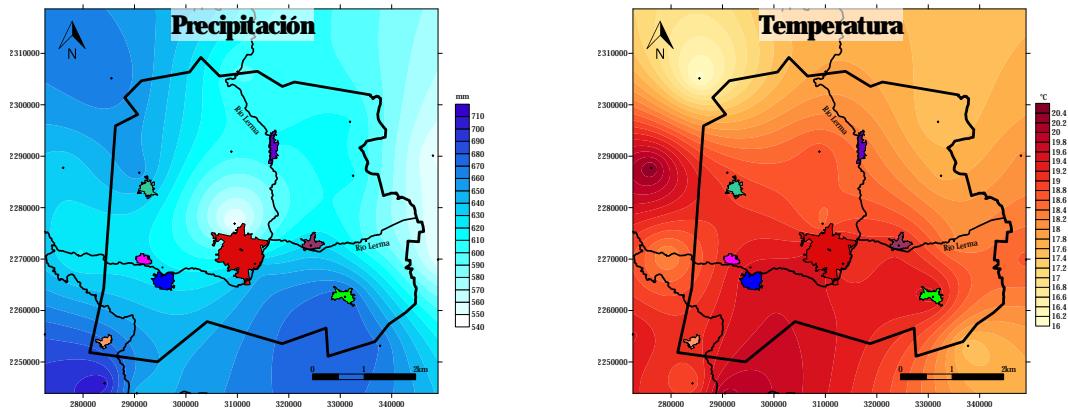


Figura 1.4: Climas en el acuífero Valle de Celaya de acuerdo a la clasificación de Köppen.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia; uno de junio a septiembre correspondiente a la temporada de verano que es cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que abarca de noviembre a febrero, con precipitaciones menos significativas, las cuales son provocadas principalmente por los sistemas frontales que afectan la región. Julio es el mes más lluvioso y mayo el más seco, en la Figura 1.5(a) se muestra la precipitación media de la zona de estudio, para obtener este ráster se hizo una interpolación con el método de Kriging de las 22 estaciones climatológicas mencionadas con anterioridad, esta misma interpolación se usó para calcular la distribución de la temperatura en el acuífero, ver Figura 1.5(b), donde se estima que los valores medios máximos de temperatura se presentan en mayo, con un promedio de 22 °C.



(a) Precipitación.

(b) Temperatura.

Figura 1.5: Distribución de precipitación y temperatura en el acuífero Valle de Celaya.

### 1.0.5. Uso de Suelo y Vegetación

En la zona de estudio, la principal actividad económica es la agricultura, mayormente de riego y posteriormente de temporal, entre los cultivos producto de esta actividad destacan la alfalfa, maíz, sorgo, trigo, frijol, hortalizas, jitomate, zanahoria, aguacate, avena, calabacita, col, lechuga, pastos, entre otros. La alfalfa cultivada en la región es destinada a la ganadería, que es otra de las actividades económicas practicadas.

En el mapa de la Figura 1.6, se puede observar la distribución que tiene tanto la vegetación compuesta por zonas de bosque, matorral, selva y pastizal cultivado, así como las zonas donde se practica la agricultura de riego y temporal.

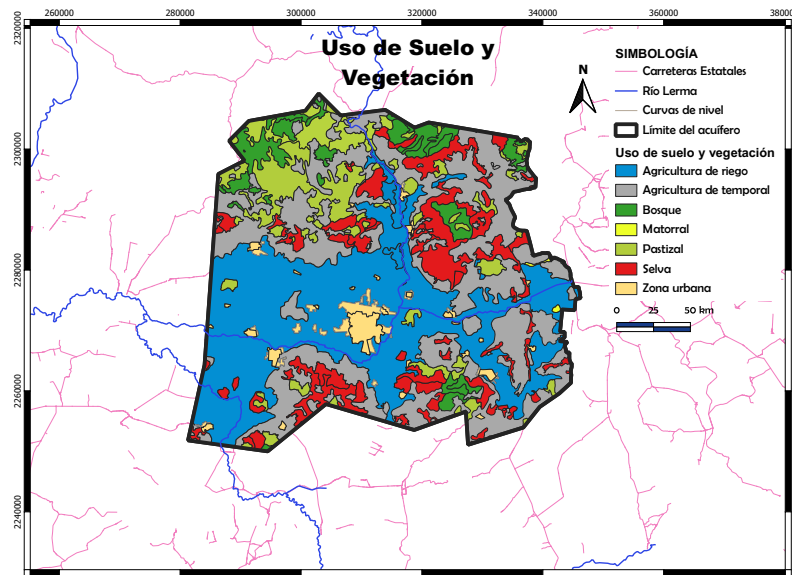


Figura 1.6: Uso de Suelo y Vegetación en el acuífero Valle de Celaya.

### 1.0.6. Edafología

Este acuífero se encuentra en una zona de rocas volcánicas básicas e intermedias, así como en sedimentos lacustres y depósitos aluviales, de acuerdo con la Figura 1.7 los suelos expuestos en esta zona son Feozem Pélico, Vertisol Pélico, Litosol y Feozem Luvico [17]. Aproximadamente el 70 % de la superficie de la zona de estudio es ocupada por Vertisol Pélico, que es un suelo cuya coloración va del negro grisáceo al rojo, y se distingue por presentar grietas de desecación en época de sequía, es muy duro, arcilloso, masivo y poco susceptible a la erosión. Su uso agrícola en el estado de Guanajuato es muy extenso, variado y productivo a causa de su fertilidad, sin embargo, su dureza dificulta su labranza.

La superficie distinguida por Litosol cubre un 7 % del acuífero, este suelo se encuentra en diferentes tipos de climas y vegetación, es un suelo muy delgado, cuyo espesor es menor de 10 cm, descansa sobre un estrato duro y continuo, tal como roca, tepetate o caliche. Además, su susceptibilidad a la erosión es muy variable ya que depende del tipo de ambiente en el que se encuentre.

De la misma manera, se distingue Feozem háplico y lúvico, cubriendo 20 y 30 % respectivamente de la superficie del acuífero. Éstos contienen una capa oscura, de consistencia suave y rica en materia orgánica y nutrientes, al igual que en Litosol, su susceptibilidad a la erosión es muy variable.

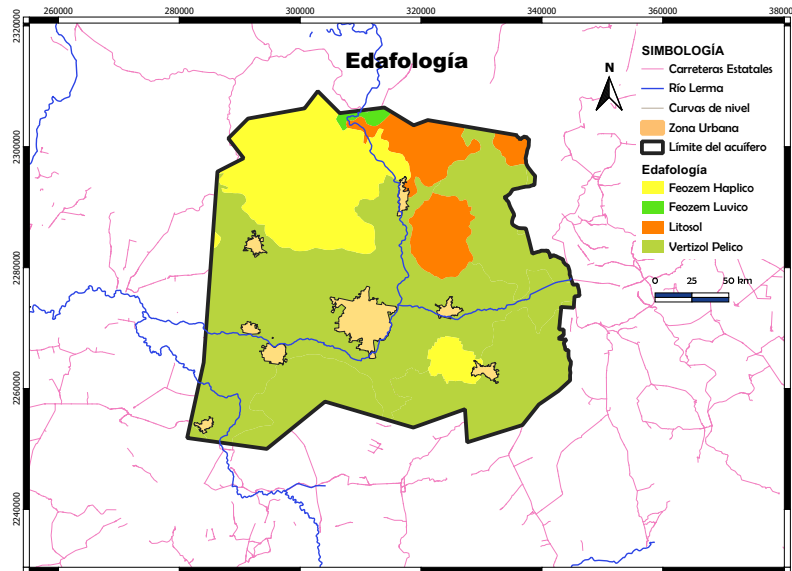


Figura 1.7: Edafología en el acuífero Valle de Celaya.

## 1.1. Marco Geológico

La evolución geológica de la zona de estudio permite estimar la distribución tridimensional de las distintas litologías del subsuelo lo cual es de suma importancia para el entendimiento del comportamiento del flujo subterráneo del agua. Tal como se aprecia en la Figura 1.3, el acuífero en cuestión se encuentra circunscrito entre dos provincias fisiográficas, Mesa Central MC y Cinturón Volcánico Transmexicano CVTM.

La Sierra de Guanajuato se encuentra dentro de la provincia MC, esta zona está caracterizada por la presencia de afloramientos de las rocas más antiguas del estado de Guanajuato, por otro lado, el eje Neovolcánico está constituido por rocas de composición básica e intermedia, cuya frontera septentrional se encuentra precisamente dentro del sistema acuífero, esta frontera se manifiesta a consecuencia de cambios abruptos en

los tipos de roca volcánicas y por la presencia de estructuras regionales que contienen grandes espesores de rocas volcánicas.

Los rasgos morfológicos de la zona de estudio están relacionados con múltiples estructuras volcánicas, existen numerosos cerros de forma cómica asociados a conos volcánicos de antiguos volcanes [18]. En términos generales el relieve presenta tres principales dominios: planicies de relleno, sierras de baja altitud y estructuras volcánicas extensas y de baja pendiente [19]. Las planicies de relleno por sedimentos lacustres y aluviales constituyen el nivel base de la región durante el Mioceno debido a que contiene rocas volcánicas de esa edad intercaladas con sedimentos lacustres (margas, calizas y pedernales) que dan indicios de la presencia de un paleo-lago que cubría la región norte.

Actualmente, la planicie se encuentra en proceso de erosión, además se observa que los arroyos y ríos escurren hacia el sur, constituyendo la cuenca del Río La Laja. Por otro lado, las sierras de baja altitud están formadas por mesetas volcánicas cuyos desniveles alcanzan el orden de 300 m con respecto a los valles y hay una prominencia topográfica del volcán San Pedro, que presenta un desnivel de 900 m con respecto del valle.

Finalmente, se presentan estructuras volcánicas extensas y de baja pendiente, originadas por derrames de lava basáltica emitidas a través de zonas de debilidad orientadas como fallas normales (NE-SO) o volcanes de escudo. La información de las elevaciones del área de estudio fueron obtenidas de una imagen satelital del Servicio Geológico de Estados Unidos USGS.

Los diversos mapas geológicos que enmarcan a la zona de estudio exponen la geología superficial del acuífero valle de Celaya, el cual se encuentra situado en gran parte sobre Arenisca-Conglomerado poligénico del Neógeno-Cuaternario, el resto corresponde a Andesita-Basalto del Neógeno, Cuaternario y Terciario, además hay Riolita-Toba riolítica del Paleógeno y del Terciario. En menores proporciones hay presencia de Caliza-Limolita con Rocas volcanosedimentarias del Cretácico, así como también

Andesita del Terciario. En resumen, en la región donde se ubica el acuífero en cuestión afloran principalmente rocas volcánicas y sedimentarias, cuyos registros estratigráficos sugieren las edades de estas rocas comprendidas entre el Cretácico y Cuaternario, ver Figura 1.8.

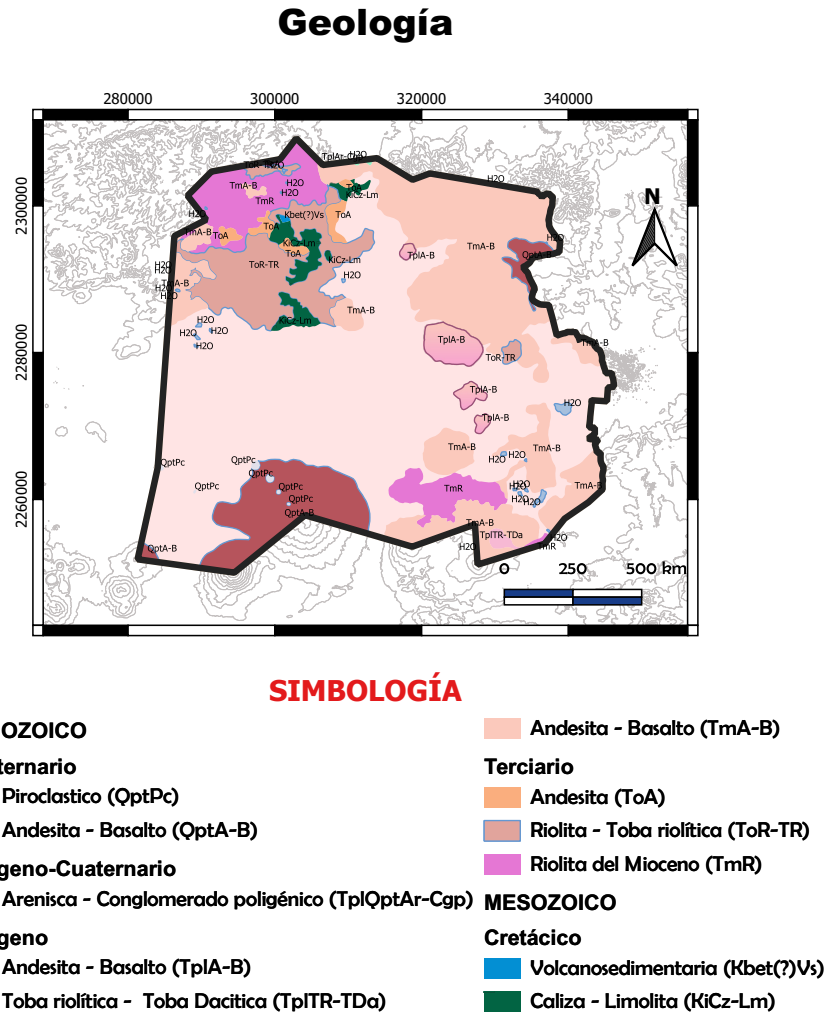


Figura 1.8: Mapa Geológico del Valle de Celaya

A continuación, se hace una descripción de las litologías del acuífero Valle de Celaya, utilizando como base información de Alaniz-Álvarez, Huizar-Álvarez y Aranda-Gómez, así como la carta geológico-minera (1: 250,000) F14-10 de Querétaro perteneciente al Servicio Geológico Mexicano (SGM), y la carta geológico-minera (1:50 000) F14C54 y F14C64 de San Miguel de Allende y Celaya, respectivamente, del SGM.

### **ToA**

Es denominada Andesita El Cedro por Alaniz-Álvarez, et. al. Su edad asignada corresponde al Oligoceno Medio. Esta unidad está compuesta por lavas cuya composición varía de basalto a andesita y tobas. Sobreyace directamente al basamento Mesozoico o se encuentra intercalada con lavas y rocas piroclásticas de la Riolita Chichíndaro [20, 21].

### **ToR-TR**

Riolita Chichíndaro, esta unidad está fechada en 30 Ma [22]. Está formada por derrames y domos de composición ácida (riolítica a riodácitica rica en sílice y alta en potasio), tobas, Ignimbritas, vitrófidios, brechas y traquitas. Tiene espesores que van de los 100 a los 400 m. Esta unidad intrusión al basamento Mesozoico por lo que lo cubre discordantemente, además está intercalada con derrames de la unidad Andesita El Cedro. Se considera que cubre gran parte de la porción sur de la Mesa Central [20].

### **TmR**

La Riolita Romero fue definida por Alaniz-Álvarez [20]. Corresponde a un derrame de riolita con una edad inferida entre el Oligoceno y Mioceno Medio. Cubre discordantemente a las ignimbritas y la Riolita Chichíndaro. La riolita presenta esferulitas en gran cantidad y su espesor llega a los 150 m. Además, presenta estructuras volcánicas que posiblemente son domos riolíticos. La Riolita Romero aflora en la zona SE del acuífero.

### **TmA-B**

Andesita y basalto La Joya. La unidad recibe este nombre de Alaniz-Álvarez, et. al. [20]. Yace discordantemente sobre las ignimbritas (TmIg) y es común observarla intercalada con areniscas y conglomerados cenozoicos. Esta unidad está compuesta por derrames fisurales de rocas basálticas y andesíticas y aparatos volcánicos, además de productos volcánicos de composición básica e intermedia provenientes de los estratovolcanes Palo Huérfano, La Joya y San Pedro. Su espesor no supera los 70 m y se le ha



asignado la edad del Mioceno Medio. Esta litología aflora tanto en el Cerro San Pedro, como en el Norte central del acuífero.

### **TplQptAr-Cgp**

Areniscas y Conglomerados cenozoicos. Unidad compuesta por sedimentos lacustres y aluviales que rellenan los valles, por lo que son el relleno de cuencas continentales como El Bajío y las cuencas asociadas a las fallas San Miguel de Allende y Querétaro. Su litología está compuesta por areniscas, conglomerados con presencia de algunas margas, lutitas, lentes de pedernal y caliza. Su edad abarca de finales del Oligoceno al Pleistoceno y tiene espesores de hasta 500 m. Presenta intercalamiento con las ignimbritas oligo-miocénicas (TmIg), Riolita Romero (TmR) y las Andesitas y Basaltos La Joya (TmA-B). Debido a que su depositación ha sido continua está sepultada por sedimentos actuales [20, 23]. Es la unidad con afloramiento de mayor extensión en la región, se observa principalmente en la región central del acuífero.

### **TplA-B**

Andesita y basalto pliocénicos. Unidad compuesta por aparatos volcánicos de rocas basálticas y andesíticas. Presentan intercalación con areniscas y conglomerados cenozoicos [20]. Los aparatos volcánicos de esta unidad se observan en la región NE de la ciudad de Celaya.

### **QptA-B**

Andesitas y basaltos pleistocénicos. Debido a la presencia de actividad volcánica de la Faja Volcánica Transmexicana, se presentan aparatos volcánicos tipo escudo, monogénéticos y numerosos conos cineríticos. Dan lugar a derrames, brechas, tobas y flujos de composición intermedia a básica (SGM). Esta unidad corresponde al Cerro Grande ubicado en la región SW del área de estudio.

### **TplTR-TDa**

Tobas riolítica y Toba dacítica, que representan derrames piroclásticos o ignimbritas. Se encuentran aflorando en superficies irregulares erosionadas, estas tobas se

forman por el depósito de cenizas volcánicas provenientes de aparatos que afloran dispersos en toda el área circundante

### **KiCz-Lm**

Calizas y Limolitas. La formación está constituida mayormente por calizas relativamente puras, de origen marino con textura variable, lentes de pedernal, así como intercalación de limo.

**QptPc** Piroclastos del Pleistoceno. Esta unidad está constituida por piroclásticos producto de los mismos centros de emisión (volcanes monogenéticos) que algunas veces están alineados con los sistemas de fracturas profundas de la corteza. Estas rocas se distribuyen en la porción sur del acuífero y en las laderas del cerro La Gavia.

#### **1.1.1. Geología estructural**

La placa norteamericana interactúa con la Placa del Pacífico y la Placa de cocos, las cuales contribuyen a la formación de una zona de subducción: trinchera centroamericana. El terreno presenta una serie de perturbaciones, y algunos pocas veces, sismos de alta frecuencia a causa de la subducción originada. Tal como se aprecia en la Figura 1.3, la zona de estudio se encuentra en las provincias Eje Neovolcánico y Mesa central, la primera es característica del tetanismo en México.

La geología estructural de la zona de estudio, está reportada por Alaniz-Álvarez, et. al. en la Figura 1.9 podemos ver la existencia de lineamientos, correspondientes a dos tendencias principales: la primera de dirección SW-NE, que afectó a las rocas andesíticas y basálticas del Mioceno, y que además dio origen a la depresión central definida por Pasquarè et al. [24]; esta depresión limita al poniente con el Lago de Chapala y al oriente con el sistema de fallas NNW-SSE de Querétaro, conocido en la literatura geológica como lineamiento Taxco-San Miguel de Allende [25]. Este lineamiento (SW-NE), quedó mejor expuesto en las rocas de los cerros Picacho, San Pedro, norte de Neutla y Juventino Rosas.

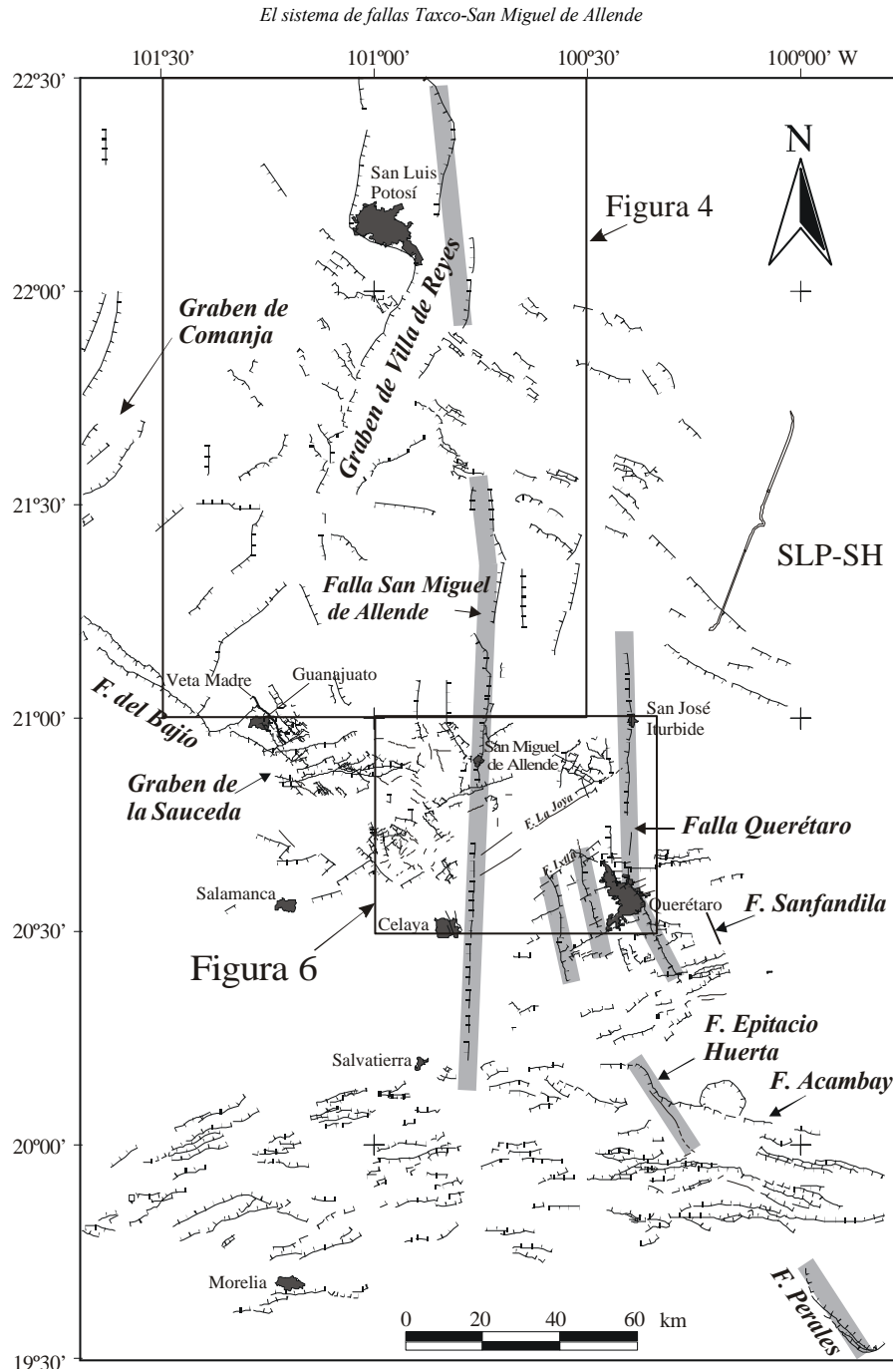


Figura 1.9: Este mapa fue tomado de [21]. Sistemas de fallas en el centro de México. SLP-SH: sistema San Luis de La Paz-Salinas Hidalgo. Las fallas fueron obtenidas de los trabajos cartográficos publicados por el Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (Labarthe-Hernández et al., 1982 y Tristán-González, 1986 entre otros), Nieto-Samaniego et al. (1999b-1999c), Suter et al. (2001) y compilados en Alaniz-Álvarez et al. (2001). En líneas gruesas grises se marcan las fallas que pertenecen al SFTSMA.

Por otra parte, al sur de la Depresión Central, este sistema de fallas fue aprovechado por el ascenso de los magmas basálticos del Plioceno-Cuaternario, lo que dio por resultado el alineamiento de los centros volcánicos en esa dirección. Ejemplo de ello son los alineamientos de los volcanes Culiacán-La Gavia y los pequeños conos alineados en esa dirección, al sur de Apaseo el Alto.

El segundo sistema estructural en importancia es el ya definido como NNW-SSE, es decir casi al norte-sur de Querétaro. Este sistema se manifiesta a través de dos largas fallas, que como ya se dijo, delimitan la depresión central en su borde oriental. Un reflejo de estos sistemas, es la exposición de rocas riolíticas e ignimbríticas más antiguas, pero la única mayor, de tendencia Este-Oeste, es la que se infiere al oriente, aparentemente sin actividad tectónica reciente.

Un caso particular ya reportado, indica que por la desmedida extracción de agua se ha propiciado la formación de fallas geológicas, debido al descenso del nivel piezométrico y a la consecuente compactación del terreno, lo cual originó hundimientos diferenciales en la ciudad de Celaya [11].

## **1.2. Modelo Hidrogeológico**

Actualmente el acuífero Valle de Celaya es una zona sobreexplotada con disponibilidad nula en la que no es posible aumentar las extracciones de agua subterránea sin causar abatimientos adicionales, es decir, este acuífero presenta un desequilibrio hidrológico, principalmente a causa de las extracciones masivas de agua para uso agrícola, aunado a esto, cada vez se extrae el agua a mayor profundidad y se recupera menos líquido. Los pozos, norias y manantiales permiten obtener información de los acuíferos, la Comisión Estatal de Agua de Guanajuato es la encargada de monitorear los niveles piezómetros de este acuífero, para la modelación se han utilizado 117 pozos, cuyo registro corresponde del año 2005 a 2019, la localización de estos pozos se encuentra distribuida a lo largo del acuífero, Figura 1.1. Este acuífero se localiza dentro del Graben de Celaya, este a su vez está formado por fosas escalonadas sepultadas por

la acumulación de sedimentos y por material volcanosedimentario con intercalaciones de derrames basálticos y tobas intermedias-ácidas con espesores de alrededor de 700 metros.

### **1.2.1. Tipo de acuífero**

Los estudios geológicos y geofísicos efectuados en el acuífero Valle de Celaya, señalan que esta formación geológica por su comportamiento hidrodinámico es un acuífero libre-semiconfinado, de tipo granular y fracturado, heterogéneo y anisotrópico. Su constitución en la parte superior es por sedimentos aluviales, areniscas y conglomerados, cuya granulometría varía desde la arcilla hasta la grava, y cuyo espesor suele alcanzar centenas de metros. La porción inferior está constituida por rocas volcánicas fracturadas de composición basáltica y riolítica, este medio presenta grandes espesores, pero con marcados patrones de fracturamiento que generan propiedades heterogéneas-anisotrópicas que determinan la ocurrencia y distribución del agua subterránea. En conclusión, el funcionamiento hidrogeológico de este acuífero es muy variado a causa de la heterogeneidad de las rocas presentes, principalmente de los basaltos y derrames volcánicos que afloran en la superficie.

### **1.2.2. Modelo Hidrogeológico**

El acuífero Valle de Celaya se definió por medio de cuatro capas, tal como se muestra en la Figura 1.10, la primera corresponde a una unidad almacenadora formada por areniscas, la segunda capa se define a partir de rocas andesíticas y basálticas en los cuales la permeabilidad es alta debido a su gran fracturamiento, la tercera capa está formada por una unidad de rocas riolíticas, y la última capa pertenece a los conglomerados y esta es considerada como la condición de frontera a causa de su baja conductividad hidráulica.

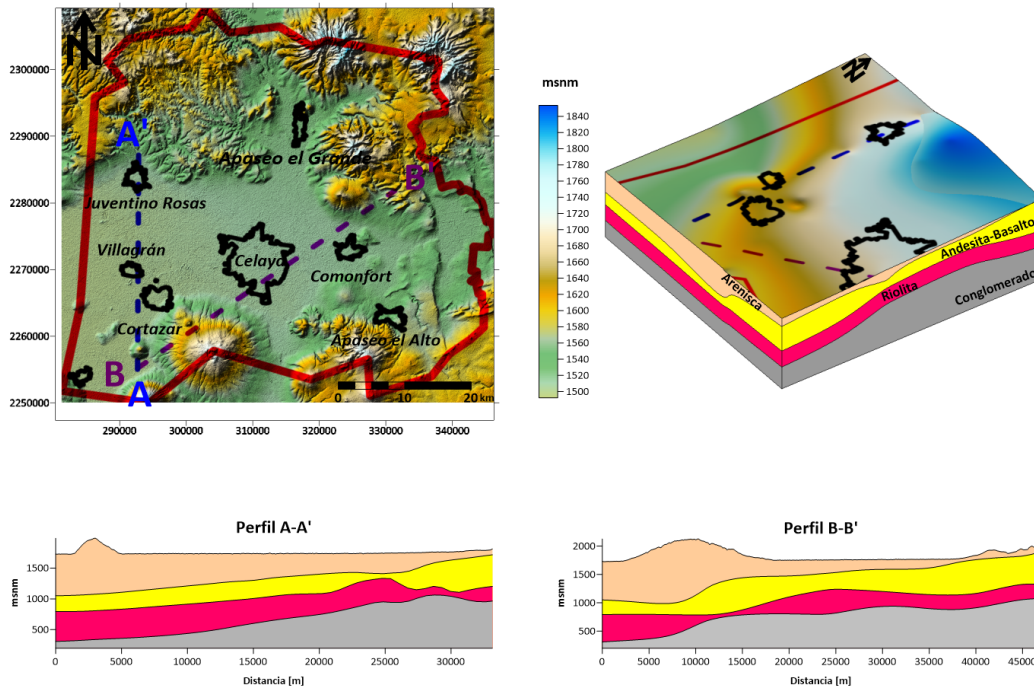


Figura 1.10: Cortes del Modelo Hidrogeológico.

## Nivel Estático

La Comisión Estatal del Agua en Guanajuato fue la institución que proporcionó los datos hidrológicos de este acuífero, sin embargo, existen dos bases de datos que se utilizaron en este trabajo, la primera corresponde del año 2005 al 2013 y la segunda de 2005 a 2019, la diferencia entre estas dos bases es que algunos pozos cambiaron de ubicación, pero mantuvieron el mismo nombre, algunos otros pozos dejaron de operar y unos más, en el segundo periodo fueron de nueva creación. Es importante aclarar que se describirá la evolución del acuífero en dos periodos: temporada de lluvias que van de Agosto a Octubre y temporada de secas de Marzo a Mayo.

Para realizar el análisis del comportamiento del nivel estático se consultaron los datos del año 2010 y 2015 para temporada de lluvias, mientras que para la temporada de secas fueron los años 2015 y 2019, además con estos datos, se configuraron los mapas de profundidad y de elevación del nivel estático.

La elevación del nivel estático se obtiene midiendo la profundidad del nivel estático que es, la distancia de la superficie al nivel de agua, esta profundidad se obtiene utilizando una sonda que se introduce en cada pozo, a la distancia medida se le resta a la altura del punto sobre el nivel medio del mar, obteniendo de esta manera la elevación del nivel estático, siempre considerando que la topografía de un área no es uniforme, cada pozo comprendido dentro de ella tiene altura diferente y para obtener esta altura se realiza la nivelación brocal poniendo un receptor GPS en cada pozo obteniendo la altura a la cual se le suma la altura del brocal, después se le resta la profundidad del nivel estático, de esta manera se obtiene la elevación del nivel estático.

### **Temporada de secas**

En el año 2015 la profundidad del nivel estático muestra que al este de Apaseo el Alto se tienen profundidades en aumento con dirección de este-oeste que van de los 60 m a los 120 m, una vez que atraviesan a todo el municipio de Comonfort, las profundidades comienzan a disminuir, dado que se aprecia un pequeño cono al sur de Celaya, este alcanza una profundidad de 90 m, además de otro cono formado en el centro de la ciudad de Celaya, con profundidad de 120 m. También es muy visible un cono más abierto al oeste de Celaya con profundidades de 60 m. Entre Celaya, Cortázar, Villagrán y Juventino rosas, de igual forma, se visualiza un marcado cono que alcanza profundidades de 150 m, finalmente, al noreste de Jaral del Progreso, las profundidades aumentan desde 30 m hasta 60 m, Figura 1.11.

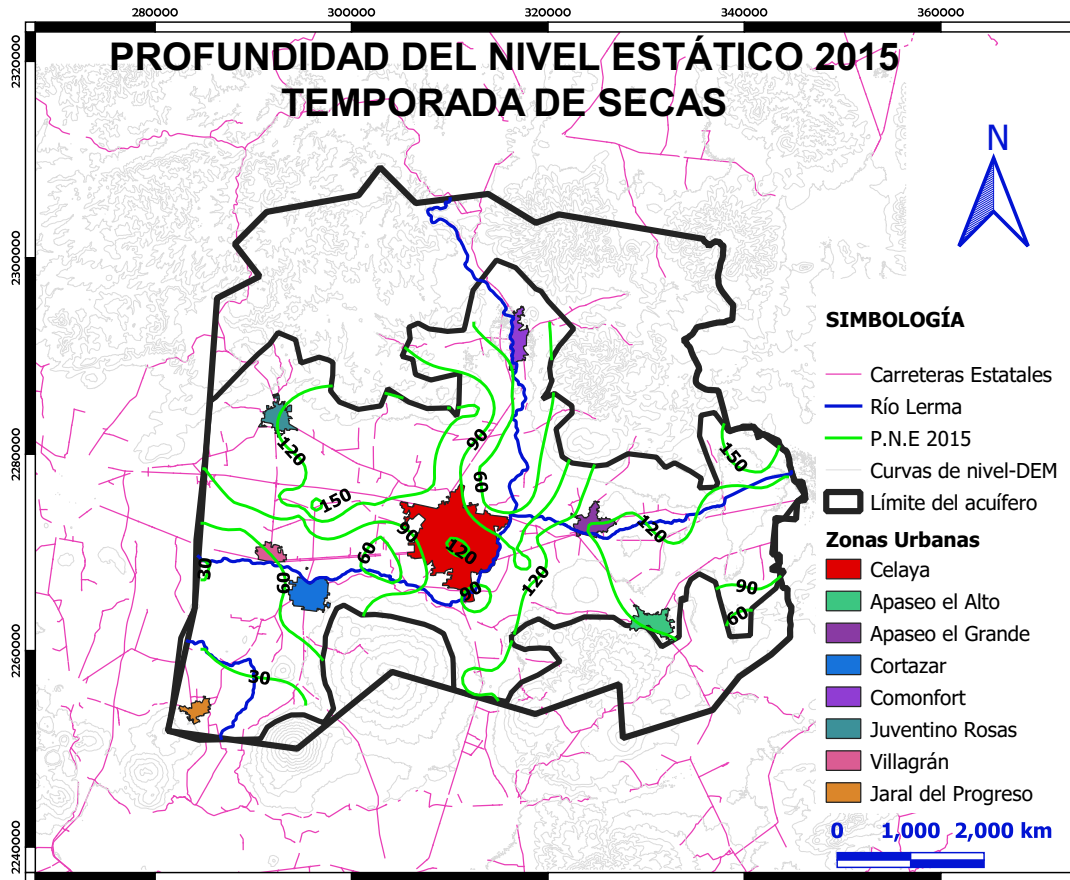


Figura 1.11: Temporada de Secas: Profundidad del nivel estático en el año 2015.

En la configuración de elevación del nivel estático del año 2015, se localizan tres posibles entradas principales de agua al acuífero; la primera se ubica desde Apaseo el Grande hasta Celaya, sin embargo, llega a alimentar un cono formado entre Celaya Juventino Rosas, Villagrán y Cortázar, quedando definido por una línea equipotencial de 1650 msnm. Una segunda entrada se visualiza al este de Jaral del Progreso, pero se forma un pequeño cono al suroeste de Villagrán y Cortázar. La ultima entrada está marcada desde Apaseo el Alto hasta el municipio de Comonfort, y de igual forma, alimenta un cono extenso al este de Celaya que alcanza una línea equipotencial de 1600 msnm, Figura 1.12.



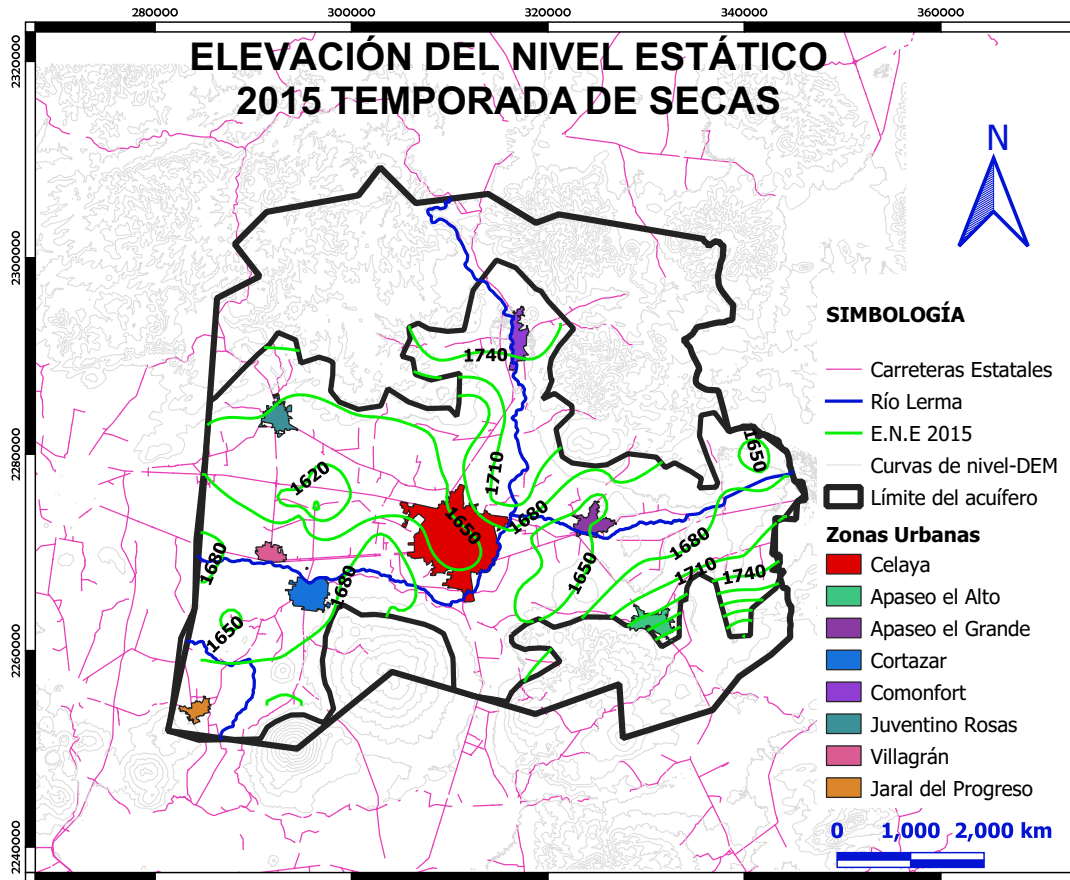


Figura 1.12: Temporada de Secas: Elevación del nivel estático en el año 2019.

En relación a la profundidad del nivel estático del año 2019, se observa la formación de varios conos, en su mayoría del lado oeste de Celaya. A partir de Jaral del Progreso las profundidades comienzan a aumentar en dirección hacia el municipio de Cortázar de 30 m a 90 m, entre los municipios de Celaya, Juventino Rosas, Villagrán y Cortázar hay una serie de conos muy cerrados que llegan a alcanzar profundidades de hasta 120 m, siguiendo hacia Apaseo el Grande, Comonfort y Celaya se ha formado un gran cono que se extiende con profundidades de 90 m en el centro hasta 120 m en estos municipios, Figura 1.13.

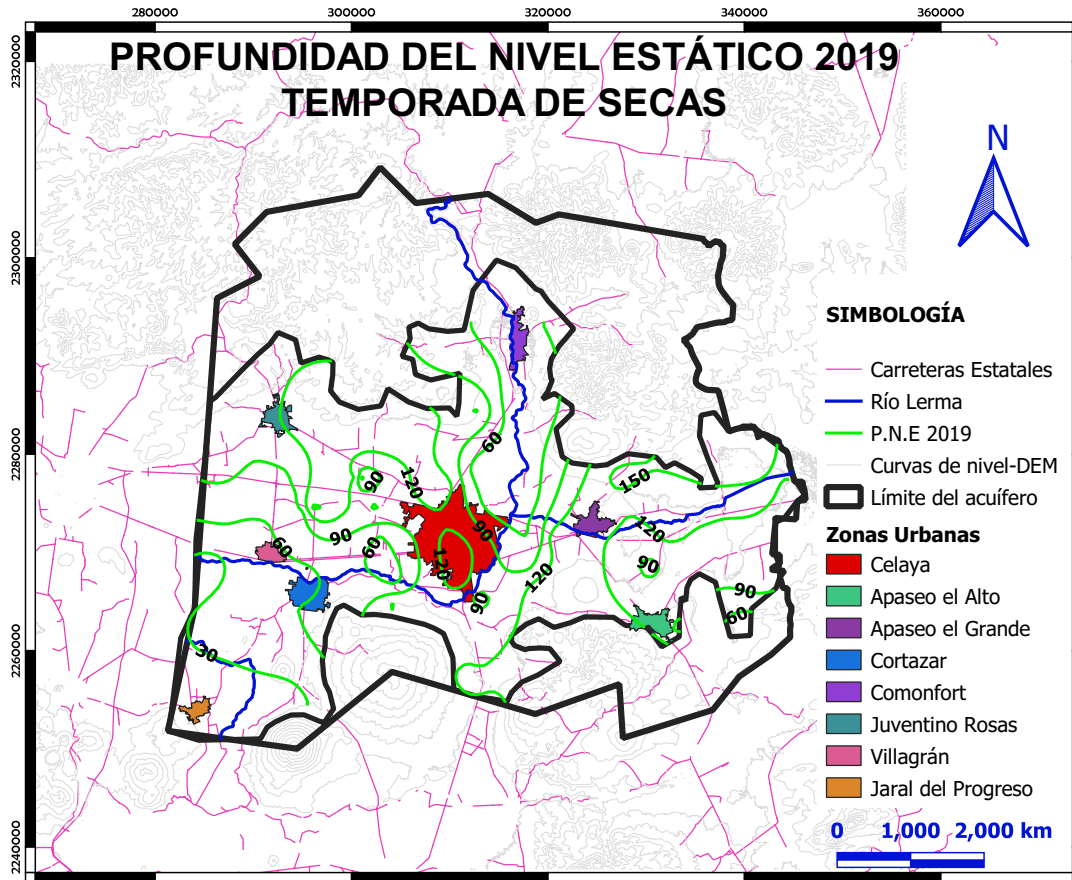


Figura 1.13: Temporada de Secas: Profundidad del nivel estático en el año 2019.

La elevación del nivel estático del 2019 permite observar las tres entradas que se visualizan en el año 2015, una de ellas ubicada en Apaseo el Alto, donde el flujo sigue su curso con dirección a los municipios de Celaya y Apaseo el Grande hasta encontrarse con el cono generado en Apaseo el Grande, el cual cubre todo este municipio y se define con la línea equipotencial 1650 msnm. También es posible observar en el centro del municipio de Celaya la formación de un cono que cubre todo el municipio, y queda definido con la línea equipotencial de 1650 msnm. Una segunda entrada se observa al este de Jaral del Progreso, el flujo se dirige hacia el noreste y sigue su curso hasta el cono generado en Celaya. Otra entrada se ubica desde Apaseo el Grande, el flujo va con dirección al sur hasta llegar a los conos de Celaya y Comonfort, Figura 1.14.

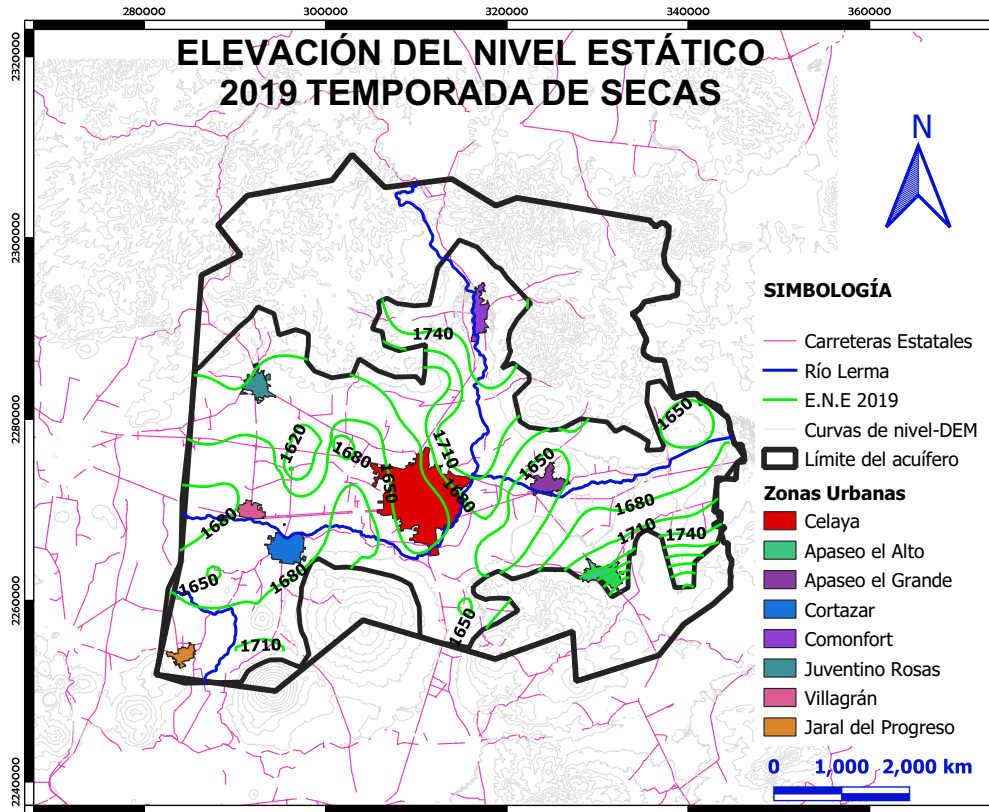


Figura 1.14: Temporada de Secas: Elevación del nivel estático en el año 2019.

### Temporada de Lluvias

La configuración de profundidad del nivel estático del año 2010, nos permite observar cuatro conos. Un primer cono ubicado al sureste de Juventino Rosas que se extiende hasta los 90 m. Un segundo cono formado entre los municipios de Apaseo el Grande y Celaya que alcanza una profundidad de 30 m. Y los otros dos conos se localizan al este y oeste de Celaya con profundidades de 60 m y 90 m respectivamente. En el noreste de Jaral del Progreso la profundidad comienza a aumentar de 30 m a 90 m, el cual forma parte de la alimentación del pequeño cono ubicado al noroeste de Celaya, Figura 1.15.

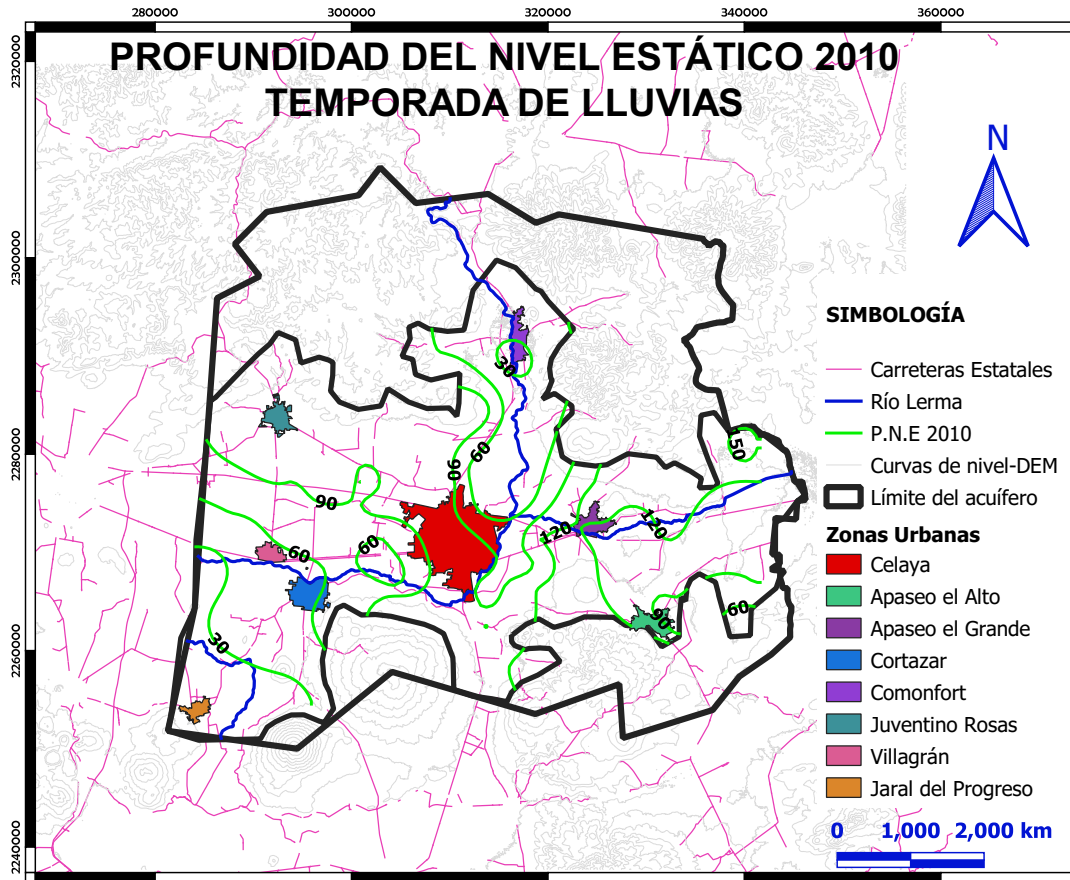


Figura 1.15: Temporada de Lluvias: Profundidad del nivel estático en el año 2010.

En la configuración de elevación del nivel estático del año 2010, se siguen conservando las tres posibles entradas de agua al acuífero que se mencionan en la temporada de secas, la primera de ellas proveniente del norte del acuífero, a la altura de Apaseo el Grande, donde el flujo sigue hasta llegar al municipio de Celaya. La otra entrada proviene del sureste del acuífero, las líneas equipotenciales van de 1700 msnm hasta los 1680 msnm, sin embargo, cerca del municipio de Comonfort y Celaya, alimentan un cono extenso de 1650 msnm. Otra de las posibles entradas sigue siendo del este del municipio de Jaral del Progreso, donde la dirección de flujo es hacia el norte, el cual también alimenta un cono, ubicado al oeste de Cortázar, también se observan pequeños conos en Celaya, uno al centro, y otros dos más al noroeste y suroeste, Figura 1.16.



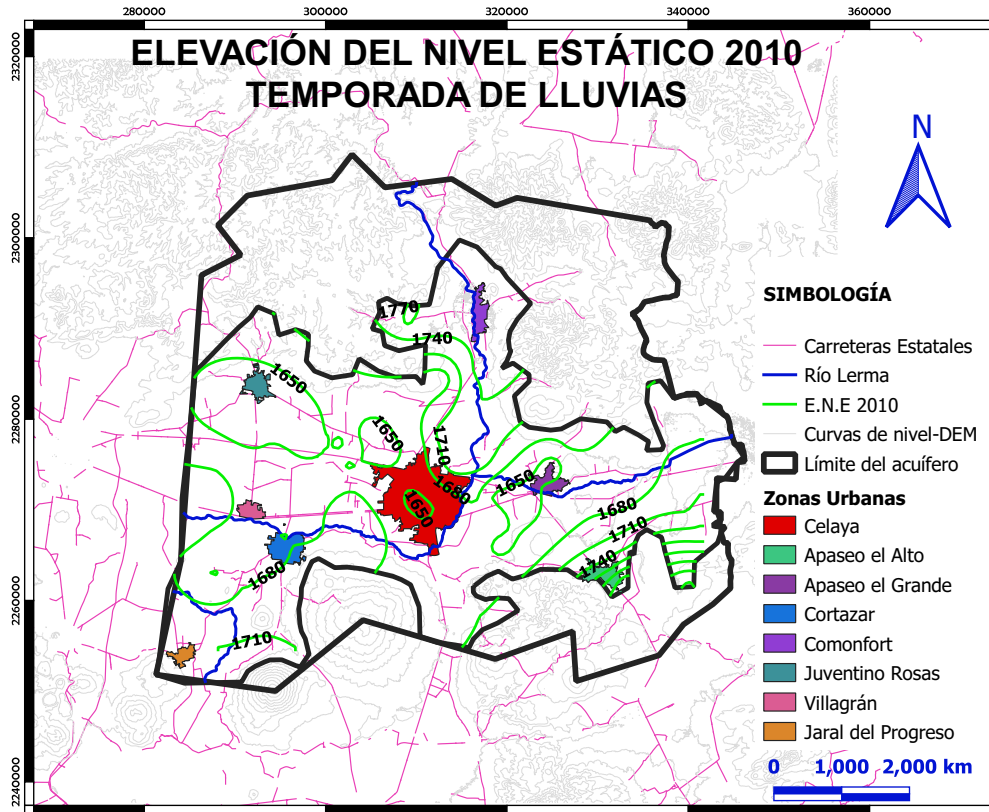


Figura 1.16: Temporada de Lluvias: Elevación del nivel estático en el año 2010.

Con relación a la profundidad del nivel estático del año 2015, se observan diversos conos distribuidos en todo el acuífero, el más grande se ubica entre los municipios de Celaya, Apaseo el Grande y Comonfort cuya profundidad llega a los 40 m, a su vez este cono se une con un segundo cono ubicado al sureste del acuífero con una profundidad de 60 m. Al oeste de Villagrán se tienen profundidades relativamente someras, al suroeste de Juventino Rosas se visualiza la formación de un cono con una profundidad de 80 m. En el municipio de Apaseo el Alto se tienen las profundidades mayores que alcanzan los 160 m, Figura 1.17.

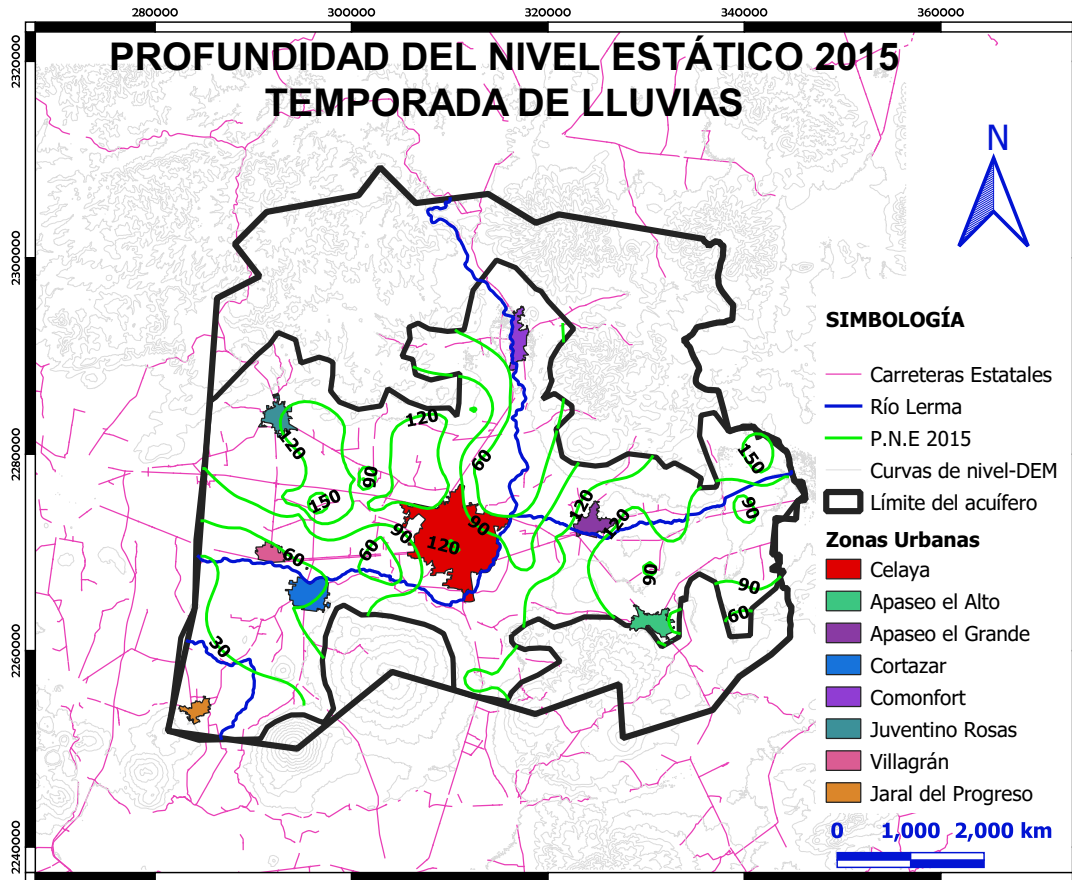


Figura 1.17: Temporada de Lluvias: Profundidad del nivel estático en el año 2015.

Para la configuración de elevación del nivel estático del año 2015 se observan las tres zonas de recarga que aparecen en la temporada de secas, una de ellas proviene desde la frontera sureste del acuífero en la que el flujo se desplaza hacia los municipios de Celaya y Comonfort, donde se encuentra un gran cono definido con la línea equipotencial de 1650 msnm y tiene una suave elongación hacia el noreste de Celaya. La segunda entrada proviene del este de Jaral del Progreso, el cual sigue una dirección noreste pasando por Cortázar y Celaya, llegando al cono que se genera entre Celaya, Juventino Rosas y Cortázar y queda definido por la línea equipotencial de 1620 msnm. Finalmente, otra entrada observada proviene del municipio de Apaseo el Grande, el flujo se dirige a alimentar el cono de Celaya, Figura 1.18.

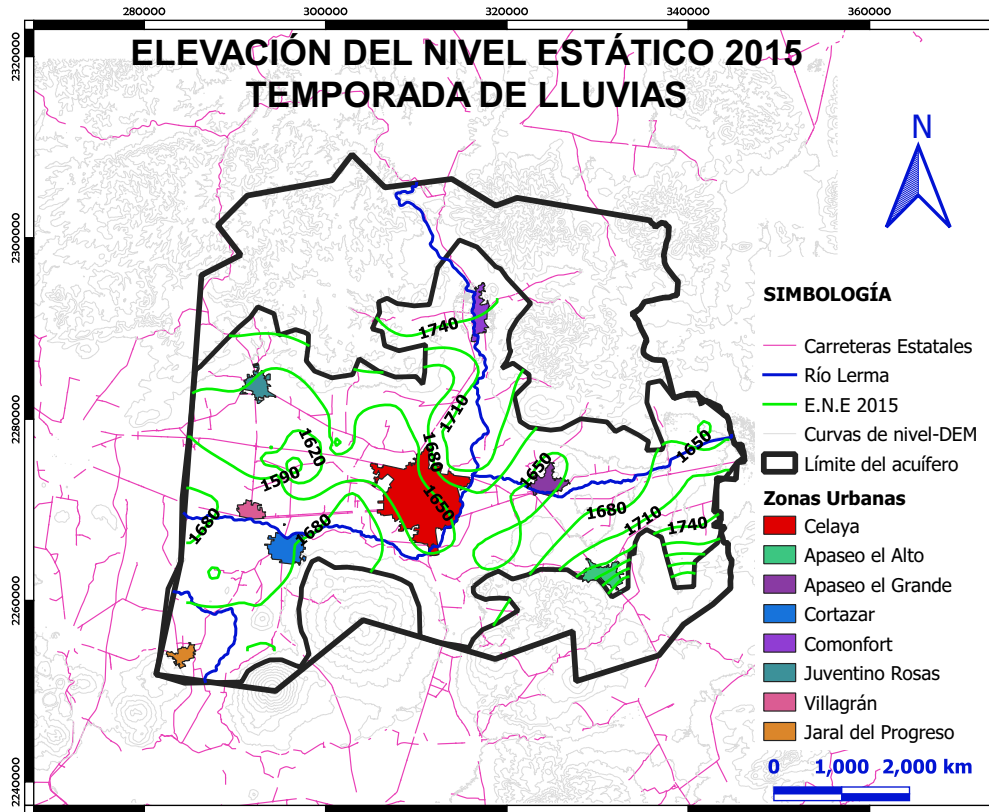


Figura 1.18: Temporada de Lluvias: Elevación del nivel estático en el año 2015.

### 1.2.3. Evolución del Nivel Estático

Con el objetivo de realizar un historial del comportamiento piezométrico en el acuífero Valle de Celaya se estimó la evolución del nivel estático tanto para la temporada en secas como en lluvias, para la primera se consideró el periodo de 2015 a 2019, mientras que para la otra fue de 2010 a 2015.

El procedimiento para el cálculo de la evolución del nivel estático consiste en la sustracción entre la elevación del nivel estático de los datos piezométricos de la fecha más antigua, menos la elevación del nivel estático de los datos con fecha más reciente, y cuyo resultado entre estos dos periodos muestra el cambio en los niveles, si el resultado es negativo significa que el acuífero recibe recarga, mientras que si el cambio es positivo esto indica que el acuífero presenta abatimientos.

Para la configuración de la evolución del nivel estático de la temporada en secas se utilizaron 78 pozos, en términos generales se aprecian importantes recuperaciones, en algunas partes del Valle no hay ni pérdida ni ganancia, pero al norte del municipio de Celaya es posible ver una gran pérdida del nivel estático de al menos 10 m, Figura 1.19.

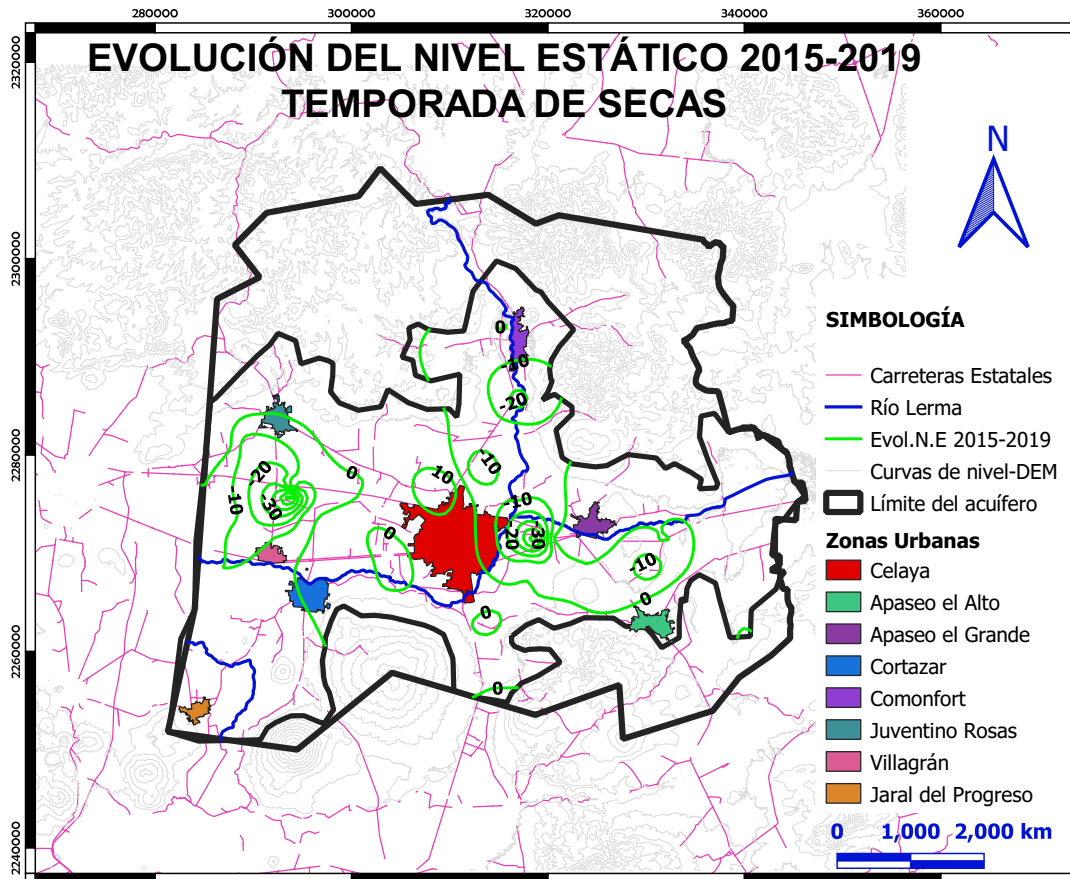


Figura 1.19: Temporada de Secas: Evolución del nivel estático 2015 – 2019

Por otro lado, se utilizaron 73 pozos en la temporada de lluvias para conocer la evolución del nivel estático, lo más destacado en este periodo de evolución, son importantes pérdidas al oeste del municipio de Celaya, que corresponde a casi la mitad del Valle, estas pérdidas llegan hasta los 20 m, por otro lado, al este de Celaya se tienen recargas de 5 m, no son altos estos valores, pero garantizan que en este intervalo de tiempo hubo recuperación de algunas áreas del acuífero.



También es posible apreciar que el acuífero es alimentado por el río Laja ya que si bien, no hay tantas ganancias, tampoco pérdidas en su trayecto, Figura 1.20.

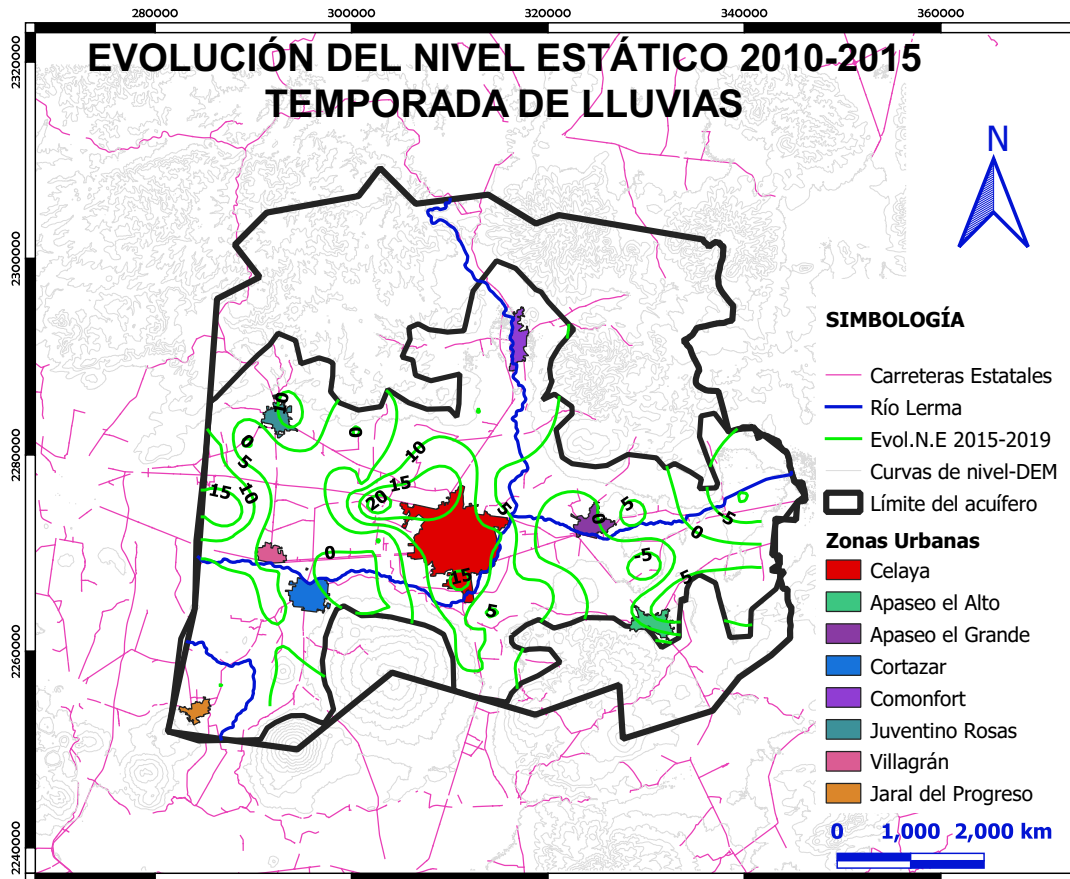


Figura 1.20: Temporada de Lluvias: Evolución del nivel estático 2010 – 2015

### 1.3. Balance de aguas subterráneas

De acuerdo con la CEAG para el año 2000, originalmente el flujo subterráneo en el acuífero tenía dirección de oriente a poniente, es decir, desde Celaya hasta los municipios de Villagrán y Salamanca, sin embargo, en la actualidad, las grandes extracciones de agua subterránea en el acuífero ha originado una deformación de un cono piezométrico al sureste de Juventino Rosas y al Noreste de Villagrán, sitio hacia el cual se dirigen los flujos de agua subterránea.

El acuífero recibe recarga de las zonas topográficamente altas, tales como las elevaciones del volcán La Gavia, Culiacán y de la Sierra Codornices, de igual manera, del río La Laja y por la infiltración de aguas superficiales. La mayor cantidad de flujo subterráneo se dispone de la Sierra del Norte al centro del Valle y de la Sierra Sur igualmente hacia el Valle. Las extracciones de agua en el acuífero principalmente son mediante el bombeo de un gran número de pozos que se extienden sobre todo el Valle.

### 1.3.1. Entradas

La recarga total (R) que recibe el acuífero tiene diferentes componentes, los tres procesos naturales son: infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle (Iv), la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh) y la infiltración proveniente a lo largo de los ríos. De manera incidental, la infiltración de los excedentes del riego agrícola de origen superficial (Rr) y de origen subterráneo (Rras), así como las fugas en el sistema de abastecimiento de agua potable y alcantarillado (Rap), constituyen otras fuentes de recarga al acuífero.

#### Entradas horizontales

Para obtener el volumen de entradas por flujo subterráneo, se consideraron las configuraciones de elevación del nivel estático para la temporada de secas del año 2019 [1.14], con base en esta configuración se selecciona la red de flujo, la cual posee líneas equipotenciales paralelas entre sí y perpendiculares a éstas se encuentran las líneas de flujo a partir de las cuales se delimitan las celdas utilizadas para cuantificar el volumen de agua que pasa a través de ellas, para esto, se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal “Q”. La forma matemática de la Ley de Darcy que se aplica para el cálculo del caudal en cada celda es

$$Q = BTi \left[ \frac{m^3}{d} \right], \quad (1.1)$$

donde  $B$  corresponde al ancho de la celda [m],  $T$  es la transmisividad de la zona  $\left[\frac{m^2}{d}\right]$ ,  $i$  es el gradiente hidráulico y se obtiene mediante la expresión

$$i = \frac{\Delta h}{L} \left[\frac{m}{m}\right], \quad (1.2)$$

donde  $\Delta h$  es la diferencia entre cargas hidráulicas  $h_2 - h_1$  [m] y  $L$  es la distancia entre las líneas equipotenciales [m], tal como se muestra en la Figura 1.21.

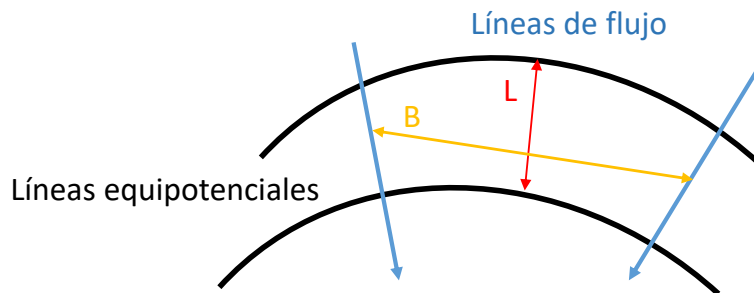


Figura 1.21: Configuración de las celdas de flujo subterráneo.

Se eligió la configuración de la elevación del nivel estático de la temporada de secas del año 2018, dado que es el que presenta mayor cantidad de datos para cubrir completamente el área de la modelación. Se utilizaron 16 celdas para las entradas horizontales, la suma de estos caudales permitieron contabilizar un volumen total de flujo subterráneo que asciende a  $175.3 \text{ Mm}^3 / \text{año}$ . Los valores de transmisividad utilizados para este cálculo se obtuvieron del promedio de las pruebas de bombeo realizadas como parte de un estudio de CONAGUA del año 2016 y otros estudios previos, adaptados al espesor saturado de cada zona.

### Recarga Natural Vertical

A partir de la base de datos del CLICLOM [16], se obtuvo información de 24 estaciones climatológicas circundantes al acuífero Valle de Celaya y con ello se construyeron los polígonos de Voronoi para determinar los valores de temperatura, precipitación y

evaporación media, sin embargo, al final se descartaron dos estaciones puesto que no tenían alcance en la zona de estudio. Las 22 estaciones climatológicas con influencia en el acuífero fueron: Ameche, Apaseo El Alto, Apaseo El Grande, Celaya (SMN), Celaya (DGE), Cortázar, Dos Arroyos, El Obraje, El Sabino, La Begoña, El Terrero, Neutla, Pericos, Presa Jalpa, Roque, Santa Rita, Valle de Santiago, Tres Guerras, Comonfort, La Joyita, El pueblito y Juriquilla, estas estaciones cuentan con varios periodos de registro, el más amplio comprende 1922-2016 y el más corto 1980-2016. Finalmente se obtuvo un volumen de precipitación de 7284 Mm<sup>3</sup>, para el cual la lámina de precipitación promedio es de 623.38 [mm].

Para el cálculo del volumen de escurrimiento en el acuífero, se localizaron las estaciones hidrométricas circundantes al área de estudio a partir de la base de datos del Banco Nacional de Aguas Superficiales BANDAS (IMTA), dando un total de 4 estaciones hidrométricas dentro del límite del acuífero, sin embargo, solo la estación Tres Guerras se localiza sobre el Río Laja; el valor de escorrentía fue de 90.18 Mm<sup>3</sup>.

Para poder calcular el volumen de infiltración se aplicó la metodología del Hidrograma Unitario Triangular (HUT) para obtener la lámina de infiltración.

### Hidrograma Unitario Triangular

Para construir el HUT es necesario determinar la precipitación efectiva  $P_e$ , la cual depende del parámetro  $N$ , este valor fue obtenido como un valor promedio determinado a partir de las tablas presentadas en el artículo titulado "Identificación del número  $N$  con base en el método del HUT, en quince cuencas rurales de dos zonas geográficas de México" [28]. La precipitación efectiva se calcula con la fórmula:

$$P_e = \frac{\left[P - \frac{508}{N} + 5.08\right]^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32}, \quad (1.3)$$

donde  $P$  es la precipitación en mm, y  $N$  es el número de escurrimiento, este número de escurrimiento  $N$  depende del uso, tipo y composición del suelo y del tratamiento, pendiente y estado de humedad del terreno.

Otra de las características del HUT se determinan mediante las siguientes formulas

$$\begin{aligned}
 t_c &= 0.01 \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64}, \\
 t_p &= \sqrt{t_c} + 0.6t_c, \\
 t_r &= 1.67t_p, \\
 q_p &= 0.208 \frac{A}{t_p},
 \end{aligned} \tag{1.4}$$

donde  $t_c$  es el tiempo de concentración de la cuenca [hrs], y está en función de la longitud del caudal  $L$  [m] y la pendiente del cauce  $S$ ;  $t_p$  corresponde al tiempo pico [hrs], que es el tiempo al máximo caudal en la cuenca o gasto pico unitario, y este valor depende del tiempo de concentración  $t_c$ ; el tiempo de recesión  $t_r$  [hrs] es el tiempo que tarda el sistema en sacar el agua;  $q_p$  es el gasto pico unitario [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{mm}$ ].

Finalmente para obtener el Hidrograma de escurrimiento directo se multiplica el gasto pico  $q_p$  unitario por la precipitación efectiva  $P_e$ , obteniendo el caudal pico  $Q_p$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$$Q_p = 0.208 \frac{A}{t_p} P_e. \tag{1.5}$$

Para obtener el volumen de escurrimiento, la formula aplicada es la del área de un triángulo, donde la base corresponde a la suma de los tiempos pico y retorno, y a la altura que es el caudal pico, por tanto

$$V_{esc} = \frac{(t_p + t_r)(Q_p)}{2}. \tag{1.6}$$

Con esta metodología se determinó el volumen de escurrimiento total, dandoun valor de  $93.53 \text{ Mm}^3/\text{año}$ , por tanto la lamina de infiltración obtenida mediante esté método es de  $0.8578 \text{ m}$ , para obtener este valor se calculó la diferencia del volumen de precipitación y el de escurrimiento, posteriormente se dividió entre el área de estudio.

### Retorno por Riego y Uso Publico Urbano

En el acuífero Valle de Celaya se ubica el Distrito de Riego N° 85 “La Begoña”, este cubre un área de 117.0222 km<sup>2</sup>, y de acuerdo con la infiltración de este acuífero, se obtuvo una recarga vertical por retorno de riego de agua superficial de 20.2 Mm<sup>3</sup>/año y un retorno horizontal de riego por agua subterránea de 82.1 20.2 Mm<sup>3</sup>/año. Además, el volumen de recarga de manera efectiva en el acuífero a través del retorno por redes de distribución de agua potable a causa de fugas es de 5.7 Mm<sup>3</sup>/año; dando un valor total por retornos de 108.0 Mm<sup>3</sup>/año.

### 1.3.2. Salidas

#### Bombeo

Las salidas por bombeo se obtienen de la hidrometría calculada en la actualización del inventario de aprovechamientos subterráneos reportados por un estudio de campo a cargo de la CEAG en el año 2016 [27], dando un volumen total de extracción estimado de 580.4 Mm<sup>3</sup>/ año.

De un total de 580.4 Mm<sup>3</sup>/año de extracciones en el acuífero, 462.5 Mm<sup>3</sup>/año son para uso agrícola, 71.1 Mm<sup>3</sup>/año es para uso público urbano, 26.7 Mm<sup>3</sup>/año para uso industrial, y 2.0 Mm<sup>3</sup> para otros usos, el cual incluye el doméstico, pecuario, recreativo, entre otros más; estos datos se pueden ver resumidos en la Figura 1.22, donde cada sector expresa el volumen de extracción en términos porcentuales.

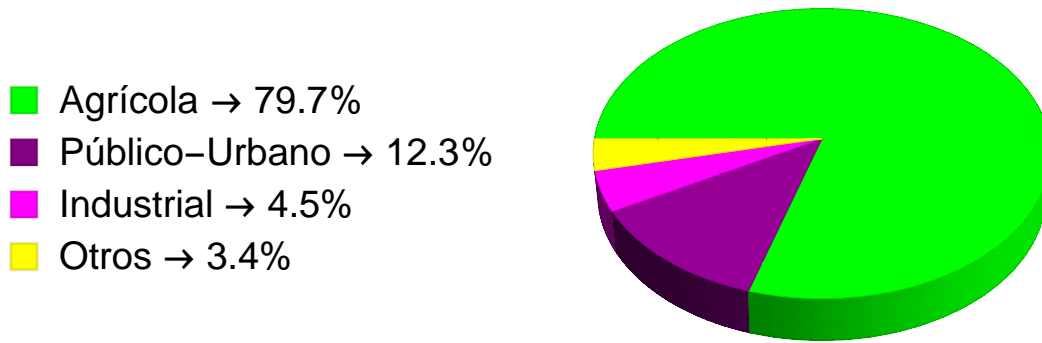


Figura 1.22: Usos del agua en el acuífero Valle de Celaya

## Evapotranspiración

### Evapotranspiración Potencial ETP

Existen diversos métodos para calcular la evapotranspiración potencial, en este trabajo se utilizó el método de Thornthwaite, el cual determina a la evapotranspiración como función de la temperatura media mensual y con una corrección en función de la duración astronómica del día y el número de días del mes.

Se inicia calculando el índice de calor mensual  $i$  en función de la temperatura media mensual  $t$ , por medio de la expresión:

$$i = \left( \frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad (1.7)$$

El índice de calor anual  $I$ , y el valor de  $a$ , se calcula a través de las siguientes expresiones

$$I = \sum i, \quad (1.8)$$

$$a = 675 * 10^{-9} * I^3 - 771 * 10^{-7} I^2 + 1792 * 10^{-5} * I + 0.49239,$$

ahora es posible calcular la evapotranspiración sin corrección a partir de la formula siguiente

$$EVP_{sc} = 16 \left( \frac{10 * t}{I} \right)^a, \quad (1.9)$$

finalmente se obtiene la EVP a través de la corrección del número de días del mes ( $d$ ) y número de horas del sol:

$$EVP = EVP_{sc} \left( \frac{N}{12} \right) \left( \frac{d}{30} \right), \quad (1.10)$$

donde  $N$  es el número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud, este valor se obtiene de tablas, en este caso se usó  $20^\circ$  N.

Por tanto, se requiere hallar  $N$  y  $d$ , sabiendo que

$$f = \frac{N}{12},$$

donde  $f$  corresponde al factor de reducción y  $d$  es el número de días del mes. Siguiendo esta metodología, se consideró que el volumen de Evapotranspiración Potencial en el acuífero es de  $2434 \text{ Mm}^3/\text{año}$ .

### Evapotranspiración Real ETR

En este trabajo se utilizó el Método de Turc para el cálculo de la EVR, el cuál utiliza datos de precipitación y temperatura anuales, y está dado por la siguiente ecuación

$$EVR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}, \quad (1.11)$$

para obtener el valor de  $L$ , se considera a la temperatura media anual  $t$  en  $^\circ\text{C}$ , aplicando la siguiente fórmula

$$L = 300 + 25t + 0.05t^3,$$

finalmente, el volumen calculado de EVR en el acuífero con este método, fue de  $1584 \text{ Mm}^3/\text{año}$ .

### 1.3.3. Coeficiente de almacenamiento

Las pruebas de bombeo indican las fluctuaciones del nivel piezométrico en un pozo durante su recuperación o abatimiento producido por el bombeo, el objetivo principal



de realizar estas pruebas se basa en conocer las características hidrodinámicas del acuífero, tales como el coeficiente de almacenamiento.

De acuerdo a las pruebas de bombeo efectuadas, así como a la información recopilada de diversos estudios realizados por parte de la CONAGUA y CEAG, se asignó un valor medio del coeficiente de almacenamiento  $S$  de 0.071.

## 1.4. Solución a la ecuación de balance

En la Tabla 1.1 se muestra la planeación del balance de aguas subterráneas para el año 2018 en Temporada de Secas, en una superficie aproximada de 1256 km<sup>2</sup>, zona en la que están dispersos los aprovechamientos (pozos de extracción) y en la que se cuenta con información piezométrica.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa queda definida de la siguiente manera

$$\text{Entradas } (E) - \text{Salidas } (S) = \Delta V, \quad (1.12)$$

donde  $E$  corresponde a todas las entradas al acuífero,  $S$  son las salidas y  $\Delta V$  es el diferencial del volumen almacenado en el acuífero en cierto tiempo y se calcula como

$$\Delta V = \Delta h * A * S, \quad (1.13)$$

donde  $\Delta h$  corresponde a la diferencia en las cargas hidráulicas durante el periodo de balance,  $A$  es el área del acuífero y  $S$  es el coeficiente de almacenamiento.

La resolución de la ecuación de balance de aguas subterráneas, se basa en la identificación de todas las fuentes que componen las entradas y salidas al acuífero, la Ec. 1.12 se reescribe como

$$Iv + Eh + Ir + Rr + Rras + Rap - B - ET = \Delta h * A * S \quad (1.14)$$

donde los aportes de agua al acuífero corresponden a la recarga natural por lluvia o Infiltración vertical ( $I_v$ ), flujo subterráneo producido por la infiltración de agua de lluvia sobre las estribaciones de las sierras y calculadas a partir de la ley de Darcy ( $E_h$ ), Infiltración en ríos ( $I_r$ ), Retornos de Riego con agua superficial ( $R_r$ ), Retornos de Riego con agua subterránea ( $R_{ras}$ ), Retorno en redes de distribución de agua Potable ( $R_{ap}$ ); y salidas por Bombeo ( $B$ ) y evapotranspiración ( $ET$ ).

En la resolución de la Ec. 1.14, se utilizó un coeficiente de almacenamiento  $S$  de 0.07, determinado a partir de las pruebas de bombeo. El  $\Delta h$  fue de 1.3 metros que, es el resultado de la evolución del nivel estático en el área del balance del acuífero. Y finalmente un área de balance  $A$ , de 1256 km<sup>2</sup>.

El Cuadro 1.1 muestra la resolución de la ecuación 1.14, donde se observa que las extracciones superan los aportes de agua en el acuífero, es decir, no existe disponibilidad de agua subterránea para otorgar nuevas concesiones y de seguir con esta tendencia, el agua en este acuífero pronto se agotará. El resultado del balance indica un déficit de 170.6 Mm<sup>3</sup>/ año. Por otro lado, el Cuadro 1.2 muestra la resolución de la ecuación 1.14 para la temporada de Lluvias, los cálculos se realizaron en función de la sección 1.3, únicamente se utilizaron los valores máximos de precipitación y por ende se modificó la recarga natural por lluvia, entradas horizontales, recarga por río, recarga por canal y evapotranspiración, el resto de los valores de los parámetros se mantuvieron.

Recarga Natural por lluvia	Rv	Mm <sup>3</sup> / año	161.0
Entradas horizontales	Eh	Mm <sup>3</sup> / año	175.3
<b>TOTAL DE RECARGA NATURAL</b>		Mm <sup>3</sup> / año	336.3
Retorno del uso Público Urbano	Rv	Mm <sup>3</sup> / año	5.7
Retorno de riego, agua subterránea	Ev	Mm <sup>3</sup> / año	82.1
Retorno de riego, agua superficial y residual	Rv	Mm <sup>3</sup> / año	20.2
<b>RETORNO TOTAL</b>		Mm <sup>3</sup> / año	108.0
Recarga por río (pérdidas de conducción)		Mm <sup>3</sup> / año	20.7
Recarga por canal (pérdidas de conducción)		Mm <sup>3</sup> / año	3.3
<b>RECARGA TOTAL</b>	<b>Entradas</b>	Mm <sup>3</sup> / año	<b>468.3</b>
Agrícola		Mm <sup>3</sup> / año	462.5
Público Urbano		Mm <sup>3</sup> / año	71.1
Industrial		Mm <sup>3</sup> / año	26.7
Otros		Mm <sup>3</sup> / año	20.0
<b>EXTRACCIÓN TOTAL BRUTA</b>		Mm <sup>3</sup> / año	580.3
Evapotranspiración		Mm <sup>3</sup> / año	58.6
<b>DESCARGA TOTAL</b>	<b>Salidas</b>	Mm <sup>3</sup> / año	<b>638.9</b>
<b>ENTRADAS - SALIDAS</b>		Mm <sup>3</sup> / año	<b>-170.6</b>

Cuadro 1.1: Variables para el cálculo de balance de agua subterránea en el acuífero Valle de Celaya en la Temporada de Secas.

Recarga Natural por lluvia	Rv	Mm <sup>3</sup> / año	178.3
Entradas horizontales	Eh	Mm <sup>3</sup> / año	201.5
<b>TOTAL DE RECARGA NATURAL</b>		Mm <sup>3</sup> / año	379.8
Retorno del uso Público Urbano	Rv	Mm <sup>3</sup> / año	5.7
Retorno de riego, agua subterránea	Ev	Mm <sup>3</sup> / año	82.1
Retorno de riego, agua superficial y residual	Rv	Mm <sup>3</sup> / año	20.2
<b>RETORNO TOTAL</b>		Mm <sup>3</sup> / año	108.0
Recarga por río (pérdidas de conducción)		Mm <sup>3</sup> / año	25.1
Recarga por canal (pérdidas de conducción)		Mm <sup>3</sup> / año	4.2
<b>RECARGA TOTAL</b>	<b>Entradas</b>	Mm <sup>3</sup> / año	<b>517.1</b>
Agrícola		Mm <sup>3</sup> / año	462.5
Público Urbano		Mm <sup>3</sup> / año	71.1
Industrial		Mm <sup>3</sup> / año	26.7
Otros		Mm <sup>3</sup> / año	20.0
<b>EXTRACCIÓN TOTAL BRUTA</b>		Mm <sup>3</sup> / año	<b>580.3</b>
Evapotranspiración		Mm <sup>3</sup> / año	55.1
<b>DESCARGA TOTAL</b>	<b>Salidas</b>	Mm <sup>3</sup> / año	<b>635.4</b>
<b>ENTRADAS - SALIDAS</b>		Mm <sup>3</sup> / año	<b>-118.3</b>

Cuadro 1.2: Variables para el cálculo de balance de agua subterránea en el acuífero Valle de Celaya en la Temporada de Lluvias.

# Capítulo 2

## Modelo numérico

Un modelo, de manera general, es una herramienta diseñada para representar una versión simplificada de la realidad, para el caso específico de la dinámica de aguas subterráneas, el modelo se formula matemáticamente mediante una serie de EDP's, que resultan no solubles en términos de funciones elementales cuando se desean resolver en un dominio físico apegado a la realidad. La solución numérica en muchas ocasiones se utiliza para la predicción de la gestión adecuada de los recursos hídricos. Los métodos numéricos proveen la herramienta más general para el análisis cuantitativo de las aplicaciones de agua subterránea, para desarrollar el modelo numérico del acuífero es necesario entender el comportamiento del sistema [29]; para este caso en específico, la Ley de Darcy es fundamental puesto que será expuesta en términos matemáticos.

La mayoría de los problemas relacionados con el flujo de aguas subterráneas resultan ser muy difíciles de resolver, por tanto, no siempre se encuentra una solución analítica, la principal razón de la complejidad de estos sistemas se debe a que los parámetros involucrados en el estudio están relacionados con la no linealidad del sistema y para poder encontrar la solución a este tipo de problemas, existen los métodos numéricos, por medio de los cuales se puede encontrar una solución aproximada. Para encontrar dicha solución, se requiere remplazar la Ley de Darcy, por un conjunto de ecuaciones que se pueden resolver con ayuda de un equipo de cómputo.

Actualmente los métodos más comunes y usados para la modelación de acuíferos son el Método de Diferencias Finitas (FDM) y el Método de Elementos Finitos (FEM), para modelar el acuífero Valle de Celaya se hace uso de MODFLOW-2005, este software resuelve la ecuación de flujo de aguas subterráneas de manera tridimensional por el método de diferencias finitas, el cual utiliza una malla rectangular donde se aplica una aproximación de las primeras derivadas de las ecuaciones en derivadas parciales como cocientes diferenciales [30].

## 2.1. Diseño del modelo matemático

Los conceptos modernos relacionados con la circulación de agua subterránea fueron formulados por el ingeniero francés Henri Darcy, a partir de mediciones y experimentos, en los cuales demostró que la velocidad de flujo del agua subterránea es proporcional a la pendiente del nivel freático, es decir, cuando más inclinada se encuentre la pendiente mayor será la diferencia de presión entre los dos puntos, por ende más rápido es el movimiento del agua, donde la pendiente del nivel freático es conocida como gradiente hidráulico [31].

Darcy de igual forma, experimentó con diferentes materiales como arenas gruesas y finas, midiendo la velocidad de flujo a través de tubos llenos de sedimentos inclinados a varios ángulos, con ello demostró que la velocidad de flujo variaba con la permeabilidad del sedimento, es decir, las aguas subterráneas fluyen con mayor velocidad a través de los sedimentos que poseen mayor permeabilidad que a través de los materiales con una permeabilidad menor, este factor es conocido como conductividad hidráulica [31].

Para determinar el caudal ( $Q$ ), es decir, el volumen real de agua que fluye a través del acuífero en un momento determinado, se utiliza la ley de Darcy para flujo laminar

$$Q = KA \frac{h_2 - h_1}{L}, \quad (2.1)$$

donde  $Q$  es la tasa de descarga [ $\frac{L^3}{T}$ ],  $K$  es la conductividad hidráulica del acuífero [ $\frac{L}{T}$ ],  $A$  es el área de la sección transversal a la dirección de flujo [ $L^2$ ],  $L$  es la longitud a lo

---

largo de la cual tiene lugar el flujo y  $h_2 - h_1$  es la diferencia de la carga piezométrica  $[L]$ .

La ec. (2.1) se puede reescribir en términos de la descarga específica  $q$ , la cual, es proporcional al volumen de agua que fluye por unidad de tiempo a través de una unidad de área de sección transversal normal a la dirección de flujo, obteniendo

$$q = K \frac{h_2 - h_1}{L}. \quad (2.2)$$

La ec. (2.2) es equivalente a

$$q = -K \frac{dh}{dl}, \quad (2.3)$$

donde  $q = \frac{Q}{A}$ , como otra forma de la Ley de Darcy,  $q$  tiene dimensiones de velocidad  $[\frac{L}{T}]$  y  $\frac{dh}{dl}$  es equivalente al gradiente hidráulico expresado en incrementos infinitesimales en el que el signo negativo se debe a que el nivel disminuye en el sentido del flujo, es decir, que  $dh$  es negativo y el signo menos hace que el caudal sea positivo.

### Extensión de la Ley de Darcy. Flujo de agua en tres dimensiones

La ecuación de movimiento de aguas subterráneas, derivada experimentalmente en la forma de la ley de Darcy, se limita a flujo en una dimensión, sin embargo, nosotros consideramos el análisis de la dinámica del flujo subterráneo mediante un sistema tridimensional  $(x, y, z)$ , por tanto, la generalización de la ec. (2.3) en 3D es

$$\vec{q} = -\sigma \cdot \nabla h(x, y, z), \quad (2.4)$$

donde  $q$  es el vector de descarga específica y  $\nabla h$  es el gradiente hidráulico con componentes  $(\frac{\partial h}{\partial x}), (\frac{\partial h}{\partial y}), (\frac{\partial h}{\partial z})$ , en las direcciones  $x, y$  y  $z$  respectivamente. Y la  $\sigma$  se considera diagonalizable a tres direcciones principales, es decir, tiene tres componentes en los ejes de las coordenadas cartesianas. El tensor simétrico es llamado tensor de conductividad hidráulica,

$$\sigma(x, y, z) = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}.$$

La ec. (2.4) se puede reescribir en términos de tres ecuaciones, un término por cada dirección

$$\begin{aligned} q_x &= -\sigma_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} - \sigma_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} - \sigma_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \\ q_y &= -\sigma_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} - \sigma_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} - \sigma_{yz} \frac{\partial h}{\partial z}, \\ q_z &= -\sigma_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} - \sigma_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} - \sigma_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.5)$$

donde las  $\sigma_{i,j,k}$  corresponden a las componentes del tensor de conductividad hidráulica. En consecuencia, ahora  $h$  es función de  $x$ ,  $y$  y  $z$ , por lo que se tienen derivadas parciales.

Para poder obtener el campo escalar  $h$  de la Ec. 2.4 se toma la divergencia de dicha ecuación a fin de que refleje el comportamiento dinámico del agua, obteniendo

$$\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla h) = 0. \quad (2.6)$$

Por tanto, la expansión en componentes de la ec. (2.6) es

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\sigma_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \sigma_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \sigma_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) &= 0, \\ (\partial x)(\partial y)(\partial z) \cdot (\sigma_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \sigma_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \sigma_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial x}(\sigma_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\sigma_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\sigma_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) &= 0, \end{aligned} \quad (2.7)$$

Cuando se combina la ec. (2.7) con el balance de agua en un volumen de control pequeño, la Ley de Darcy conduce a una ecuación diferencial parcial que describe la distribución de la carga hidráulica:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\sigma_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\sigma_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\sigma_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) + Q'_s = SS \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.8)$$

donde  $Q'_s$  es la tasa de flujo volumétrico por unidad de volumen que representa fuentes y sumideros de agua, siendo  $Q'_s$  negativo para el flujo que sale del sistema de agua subterránea y  $Q'_s$  positivo para el flujo entrante [ $T^{-1}$ ];  $SS$  corresponde al almacenamiento específico del material poroso [ $L^{-1}$ ] y  $t$  es el tiempo [ $T$ ]. En general  $SS$ ,  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ , suelen estar en función del espacio, mientras que  $Q'_s$  puede estar en función tanto del espacio como del tiempo [32].



## 2.2. Método de Diferencias Finitas FDM

El FDM utiliza la matemática convencional y sustituye las derivadas por diferencias finitas hasta llegar a obtener un sistema de ecuaciones algebraicas para toda la zona de estudio y el cual puede ser resuelto por métodos directos o iterativos. La aproximación de derivadas puede realizarse de diferentes manera, la forma más popular se basa en la expansión de la serie de Taylor [33], la cual es una aproximación de funciones mediante una serie de potencias o suma de potencias enteras de polinomios, dicha suma se calcula a partir de las derivadas de la función para un determinado valor o punto suficientemente derivable sobre la función y en un entorno donde converja la serie, la forma más compacta de la serie de Taylor es

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x_i)}{n!} (x - x_i)^n, \quad (2.9)$$

donde  $n!$  es el factorial de  $n$  y  $f^{(n)}(x_i)$  denota la  $n$ -ésima derivada de  $f$  para el valor  $x_i$  de la variable respecto de la cual se deriva.

La Ec. 2.8 es útil para describe el flujo de agua subterránea en condiciones de no equilibrio en un medio heterogéneo y anisotrópico, siempre que los ejes principales de conductividad hidráulica estén alineados con las direcciones de las coordenadas. Una solución a esta ecuación en sentido analítico, es una expresión algebraica que da  $h(x, y, z, t)$  tal que, cuando las derivadas de  $h$  con respecto al espacio y el tiempo se sustituyen en la Ec. 2.8, se satisfacen la ecuación y sus condiciones iniciales y de contorno.

En el desarrollo de la ecuación de diferencias finitas se asume que la cuadrícula en MODFLOW es rectangular horizontal y verticalmente, además la carga,  $h$ , es una función del tiempo y del espacio, de modo que, en la formulación de diferencias finitas se hace la discretización del dominio del tiempo continuo. El tiempo se divide en pasos de tiempo y la carga se calcula en cada paso de tiempo.

### 2.2.1. Serie de Taylor de Primer Orden

Es necesario realizar varias operaciones matemáticas, con el fin de obtener el esquema adecuado que refleje el comportamiento de la dinámica del agua subterránea, para ello se considera la expansión de la serie de Taylor para  $x_i$ , basada en un esquema de diferencias centradas de primer orden (ver Figura 2.1), obteniendo

$$\begin{aligned}
 f(x_{i-1}) &= f(x_i - \Delta x) = f(x_i) - f'(x_i)\Delta x + O(2), \\
 f(x_i) &= f(x_i), \\
 f(x_{i+1}) &= f(x_i + \Delta x) = f(x_i) + f'(x_i)\Delta x + O(2).
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

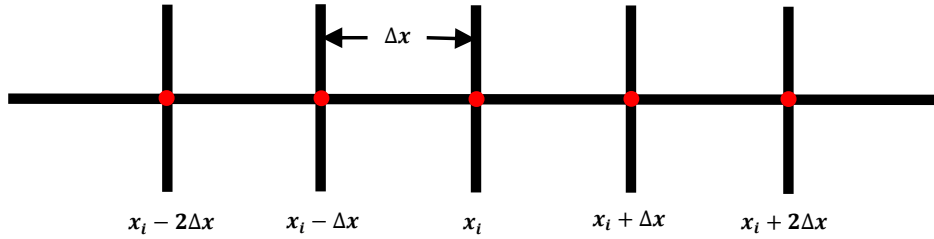


Figura 2.1: Esquema de Diferencias Centradas

Del conjunto de ecuaciones (2.10), y al hacer los cálculos pertinentes se despeja  $f'(x_i)$

$$f'(x_i) \approx \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{(2\Delta x)^2},
 \tag{2.11}$$

por lo que la primera derivada en la dirección  $x$  de  $h(x, y, z)$  se aproximan como

$$\frac{\partial h}{\partial x} \approx \frac{h_{i+1,j,k} - h_{i-1,j,k}}{(2\Delta x)^2},
 \tag{2.12}$$

donde  $i, j, k$  son índices en las particiones del dominio para  $x, y, z$ ; en el mismo sentido, a partir de las ecuaciones de 2.10, se obtiene la primera derivada en las direcciones  $y$  y  $z$ , respectivamente

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial h}{\partial y} &\approx \frac{h_{i,j+1,k} - h_{i,j-1,k}}{(2\Delta y)^2}, \\
 \frac{\partial h}{\partial z} &\approx \frac{h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k-1}}{(2\Delta z)^2}.
 \end{aligned}$$

Por otro lado, para obtener la primera deriva con respecto al tiempo de la ec. 2.9, se hace uso del esquema de diferencias hacia adelante, esto a causa de que si se usa el esquema de diferencias centrales en relación con el tiempo, el sistema se vuelve inestable. Por tanto, la primera derivada con respecto al tiempo es

$$\frac{\partial h}{\partial z} \approx \frac{h_{i,j,k}^{n+1} - h_{i,j,k}^n}{\Delta t}. \quad (2.13)$$

donde  $i, j, k$  son los puntos espaciales y  $n$  es el temporal.

### 2.2.2. Ecuación en Diferencias Finitas

Tal como se mencionó con anterioridad, el desarrollo de la ecuación de flujo de agua subterránea en forma de diferencias finitas se deriva de la aplicación de la Ecuación de continuidad: la suma de todos los flujos que entran y salen de una celda debe ser igual a la tasa de cambio en el almacenamiento dentro de la celda. Bajo el supuesto de que la densidad del agua subterránea es constante, la ecuación de continuidad que expresa el equilibrio de flujo de una celda es

$$\sum Q_i = SS \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V, \quad (2.14)$$

donde  $Q_i$  es la tasa de flujo dentro de la celda [ $L^3T^{-1}$ ],  $SS$  es la notación correspondiente al almacenamiento específico en el FDM, su definición es equivalente a  $S_s$  en la ecuación de flujo, es decir  $SS$  corresponde al volumen de agua que se puede inyectar por unidad de volumen al material del acuífero por unidad de cambio de la carga [ $L^{-1}$ ].  $\Delta V$  es el volumen en la celda y  $\Delta h$  es el volumen de la carga durante un intervalo de tiempo de longitud  $\Delta t$ .

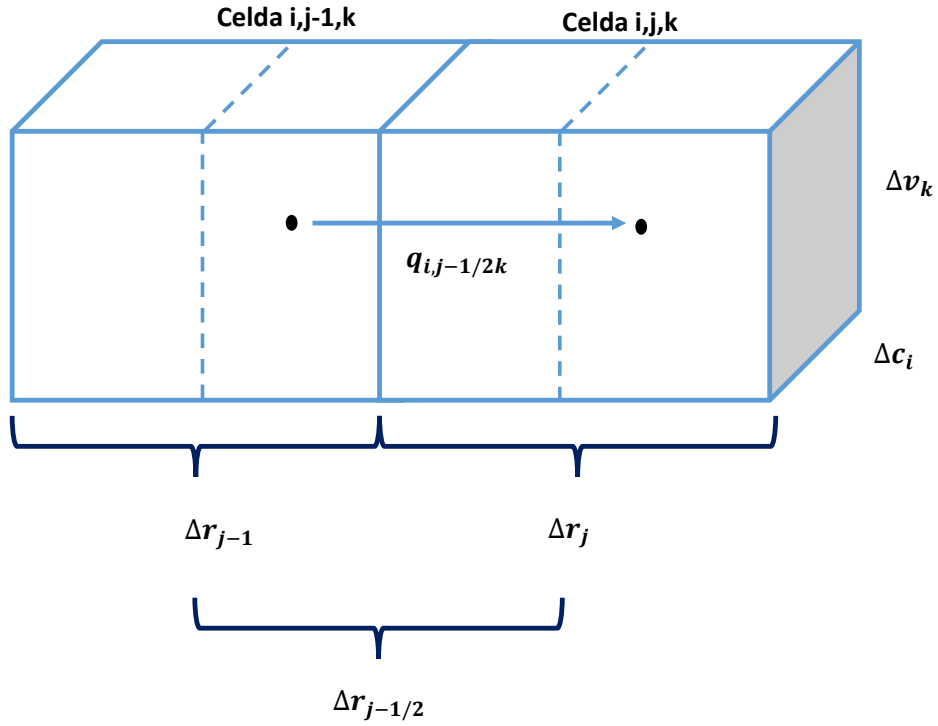


Figura 2.2: Flujo hacia la celda  $i,j,k$  desde la celda  $i,j-1,k$  (Modificado de McDonald y Harbaugh, 1988 [34]).

Tal como se muestra en la Figura 2.2, los flujos son positivos si entran a la celda  $i, j, k$ ; el signo negativo de la Ley de Darcy se elimina de todos los términos. Considerando el flujo hacia la celda  $i, j, k$  en la dirección de la fila desde la celda  $i, j - 1, k$ , viene dado por la ley de Darcy

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \left( \frac{h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta r_{j-1/2}} \right), \quad (2.15)$$

donde  $h_{i,j,k}$  es la carga en el nodo  $i, j, k$ ,  $q_{i,j-1/2,k}$  es la tasa de flujo volumétrico a través de la cara de las celdas  $i, j, k$  e  $i, j - 1, k$ .  $\Delta c_i \Delta v_k$  corresponde al área de las caras de la celdas normal a la dirección de la fila y  $KR_{i,j-1/2,k}$  es la conductividad hidráulica a lo largo de la fila entre los nodos  $i, j, k$  e  $i, j - 1, k$ . La notación  $i - 1/2$  considera las cantidades dentro de la celda y no en los nodos.

Para la dirección de la columna, el flujo hacia el bloque a través de la cara frontal queda definido como

$$q_{i+1/2,j,k} = KR_{i+1/2,j,k} \Delta r_j \Delta v_k \left( \frac{h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}}{\Delta c_{i+1/2}} \right), \quad (2.16)$$

mientras que para la dirección vertical, la entrada a través de la cara inferior es

$$q_{i,j,k+1/2} = KR_{i,j,k+1/2} \Delta r_i \Delta c_i \left( \frac{h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}}{\Delta v_{k+1/2}} \right). \quad (2.17)$$

Del mismo modo que en las tres anteriores ecuaciones, se pueden escribir expresiones similares aproximando el flujo hacia la celda a través de las cinco caras restantes de cada volumen elemental. También cada una de estas ecuaciones expresa el flujo de entrada a través de una cara de la celda  $i, j, k$ , en términos de carga, dimensiones de la cuadrícula y conductividad hidráulica. La notación se puede simplificar combinando las dimensiones de la cuadrícula y la Conductividad hidráulica en una sola constante: Conductancia hidráulica

$$CR_{i,j-1/2,k} = \frac{KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k}{\Delta r_{j-1/2}}, \quad (2.18)$$

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  $i, j, k$  [ $L^2 T^{-14}$ ]. Por lo tanto, la conductancia es el producto de la conductividad hidráulica y el área de la sección transversal al flujo, dividido por la longitud de la trayectoria del flujo en este caso la distancia entre los nodos.

Poniendo la Ley de Darcy en términos de conductancia, se tiene que

$$q_{i,j-1/2,k} = CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}), \quad (2.19)$$

si se consideran flujos externos, como ríos drenaje, recarga, evapotranspiración, pozos, etc., se requiere un tiempo de adición. El flujo desde el exterior del acuífero puede representarse por la expresión

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n}, \quad (2.20)$$

donde  $a_{i,j,k,n}$  representa el flujo desde la  $n$ -ésima fuente externa a la celda  $i, j, k$  [ $L^3 T^{-1}$ ],  $p_{i,j,k,n}$  y  $q_{i,j,k,n}$  son constantes [ $L^2 T^{-1}$ ] y [ $L^3 T^{-1}$ ] respectivamente.

Aplicando la ecuación de continuidad a la celda  $i, j, k$  y teniendo en cuenta los flujos de las 6 celdas adyacentes, cambio de almacenamiento y caudal externo se tiene

$$\begin{aligned}
 & q_{i,j-1/2,k} + q_{i,j+1/2,k} + q_{i-1/2,j,k} + q_{i+1/2,j,k} + q_{i,j,k-1/2} \\
 & + q_{i,j,k+1/2} + P_{i,j,k}h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t},
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

donde  $\Delta h_{i,j,k}/\Delta t$  es la aproximación en diferencias finitas para la derivada de la carga con respecto al tiempo [ $LT^{-1}$ ].  $SS_{i,j,k}$  representa el almacenamiento específico de la celda  $i, j, k$  [ $L^{-1}$ ] y  $\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$  corresponde al volumen de la celda  $i, j, k$  [ $L^3$ ].

La ecuación 2.21 se puede reescribir en términos de conductancia, por tanto

$$\begin{aligned}
 & CR_{i,j-1/2,k}(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + CR_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \\
 & + CC_{i-1/2,j,k}(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) + CC_{i+1/2,j,k}(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) \\
 & + CV_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \\
 & + P_{i,j,k}h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t},
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

donde  $CR$ ,  $CC$  y  $CV$  corresponde a las conductancias en columna, fila y capa. La aproximación en diferencias finitas para la derivada del tiempo de la carga se debe expresar en términos de carga específica y tiempo, por tanto

$$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \simeq \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}}. \tag{2.23}$$

## 2.3. Modelación Matemática con MODFLOW

De acuerdo con Dutton y Mace [35], Modflow es un programa muy popular entre los hidrogeólogos dado que existen actualizaciones continuas de los paquetes y sus capacidades, el soporte técnico de sus pre y post-procesadores, la versatilidad y capacidad de expansión por el modelador y las oportunidades de capacitación. El modelo se corrió en Modflow-2005, dado que el programa es amigable con el usuario y permite entender, usar y modificarlo fácilmente y además resuelve la ecuación de flujo de aguas subterráneas en 3D por el método de diferencias finitas, tal como se explica en la sección 2.2, donde se aplica una aproximación de las primeras derivadas de las ecuaciones en derivadas parciales como cocientes diferenciales [30].

Este programa tiene la capacidad de modelar sistemas tanto en estado estacionario como transitorio, también se pueden definir capas hidrogeológicas como libres, confinadas y semi-confinadas y simulan los esfuerzos en el sistema mediante la adición de pozos, drenes, evapotranspiración, zonas de recarga, ríos, entre otros más. Adicionalmente, se declaran valores de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento, en cada una de las direcciones del espacio, donde los valores pueden ser distintos para cada capa.

### 2.3.1. Discretización espacial y temporal

El acuífero Valle de Celaya se encuentra definido entre una serie de sierras y cerros de forma dómitica, es una planicie de sedimentos lacustres y aluviales que se encuentra con una elevación por debajo de los 1800 msnm, de esta forma se definió que el área a modelar tiene una superficie aproximada de 1256 km<sup>2</sup>, misma que se distribuye en una malla de 65 celdas en dirección X y 59 celdas en dirección Y, siendo un total de 3835 celdas cuadradas con dimensiones de 1 km por lado, de este total, únicamente 1624 celdas estarán activas en el proceso de las simulaciones, el resto de las celdas son inactivas porque corresponden a las principales elevaciones topográficas y hay ausencia de piezómetros, Figura 2.3. Tal como ya se vió en la sección 1.2.2, en la vertical se especificaron cuatro capas, las cuales son consideradas en la modelación.

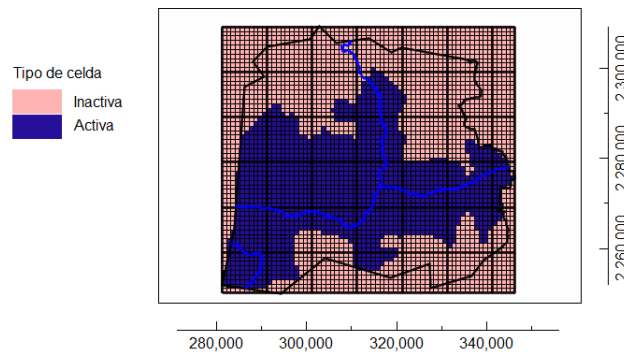


Figura 2.3: Discretización espacial, vista en planta del modelo.

La superficie del terreno, es decir, la cima de la capa 1 corresponde al DEM de la zona, posteriormente se obtuvo el espesor de los materiales del sistema acuífero del resto de las capas a partir de diversos estudios geofísicos y reportes técnicos, con esta información se crearon las diferentes capas en Surfer. Los sedimentos lacustres y aluviales presentan un tamaño de grano muy variable en pocos centímetros de profundidad, por tanto, su comportamiento hidrogeológico se consideró homogéneo, la elección de diseñar 4 capas hidrogeológicas se basa en la variación de la profundidad de los bloques de cada roca presente en el acuífero. De las cuatro capas del modelo, la primera se trató como convertible debido al carácter semiconfinado del acuífero y las tres capas restantes como confinadas. Con respecto al tiempo de la modelación, se estableció un periodo de estrés con duración de cinco años para la temporada en secas y lluvias.

### **2.3.2. Geometría del acuífero**

De acuerdo con la distribución y forma de las fosas tectónicas presentes en el acuífero, la granulometría de los materiales aluviales varía desde arcilla a grava y su espesor alcanza varias centenas de metros, por otro lado, el medio volcánico fracturado presenta un gran espesor, con propiedades heterogéneas-anisótropas debido al patrón de fracturamiento que determina la ocurrencia y distribución del agua subterránea.

Para la modelación se conserva la distribución de celdas activas desde la primera capa hasta la última, eso sí, se respeta la comunicación que se tiene en cada una de las capas del acuífero, haciendo distinción entre estas capas solamente por las variaciones de los parámetros hidrogeológicos.



### 2.3.3. Condiciones iniciales y de frontera

El área modelada del acuífero se limitó por los sedimentos lacustres y aluviales, por medio del seguimiento de la curva de nivel de 1850 msnm se restringió el límite del acuífero a un valle. Asimismo, se distingue una frontera interna o de flujo: los ríos (Figura 2.3). Debido a que se tiene una planicie rodeada de sierras y cerros, la dirección del flujo sigue su tendencia natural de mayor a menor topografía, los aportes provenientes de las máximas elevaciones descargan hacia el Valle de Celaya, Figura 2.4.

Para representar los aspectos hidrológicos naturales del acuífero, MODFLOW emplea distintas paqueterías, a continuación, se exponen las utilizadas en el modelo.

**RIV:** Para cada tramo de los ríos (río Laja y Río Lerma) se utilizó un valor diferente de conductancia en  $[m^2/día]$ .

**RCH:** Se determinó el valor de la recarga vertical a partir de la suma de los volúmenes de recarga natural de lluvia, retorno del uso público urbano, retorno de riego de agua subterránea, superficial y residual. Posteriormente, se obtuvo el valor de la lámina de recarga en  $[m/día]$ , la cual fue asignada en el paquete.

**GHB:** Con esta paquetería se definieron todas las zonas de entradas horizontales, esta represe las sierras y montañas del acuífero; se asignaron en función de la configuración de profundidad del nivel estático, para la temporada de secas se utilizó al año 2019 y para la temporada de lluvias el año 2015. Se les asignó un diferente valor de conductancia en  $[m^2/día]$ .

**EVT:** Esta paquetería se utilizó para expresar las salidas por evapotranspiración, y esta admite dicho valor a través de una lámina calculada en  $[m/día]$ .

**DRN:** Se le asignó un valor de conductancia en  $[m^2/día]$  para representar el valor del aporte del canal de Riego.

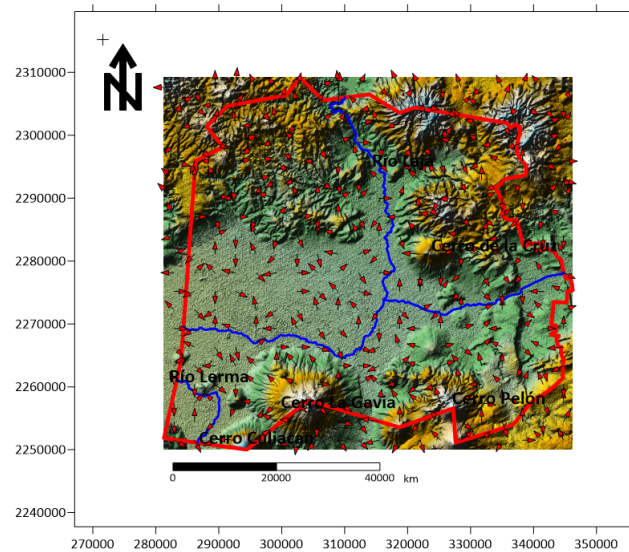


Figura 2.4: Dirección del flujo natural del Acuífero Valle de Celaya.

### 2.3.4. Parámetros Hidrogeológicos

Los aspectos hidrogeológicos que forman parte del sistema modelado son las conductividades hidráulicas (horizontal y vertical) en metros por día, y el coeficiente específico [Adimensional]. Las fronteras laterales se consideraron como pozos que simulan la recarga por flujo subterráneo deducidas de las celdas, así como pozos de extracción que corresponden a la salida por flujo subterráneo en el Valle.

Con respecto a las conductividades horizontales, éstas se asignaron de acuerdo a los valores arrojados por las pruebas de bombeo y por el tipo de materiales existentes, reportados por Lesser [9], este parámetro varió de 2.5 a 5.0 m/día. Para el caso de la conductividad vertical se consideró pertinente conservar la relación del equivalente al 10% de la conductividad horizontal, tal como lo reporta Freeze [31].

### 2.3.5. Calibración en estado Estacionario

Para la simulación en estado estacionario se establece que el sistema a modelar permanece en equilibrio dado que no está involucrada la variable del tiempo, es decir, las cargas hidráulicas permanecen sin cambio alguno porque no hay factores externos que intervengan en el proceso.

En este caso, para la simulación del acuífero Valle de Celaya, se consideró como carga inicial la elevación del nivel estático del año 2015, el tiempo establecido fue de un día. En este proceso de calibración, se buscó tratar de reproducir los valores de las cargas hidráulicas medidos en campo. Los parámetros calibrados fueron entradas subterráneas (GHB), entradas por río (RIV), recarga (RCH), canales (DRN) y evapotranspiración (ET). Para incorporar los parámetros hidrogeológicos en Modflow-2005, se recurre al uso de diferentes módulos, donde se ingresan principalmente los valores de láminas por unidad de tiempo, conductancias y periodos de esfuerzo.

Cabe señalar que esta calibración se llevó a cabo mediante el método de ensayo y error, principalmente se varió la conductancia en el río, dado que fue uno de los parámetros con mayor incertidumbre, además durante este estado no se consideró el efecto de bombeo, únicamente se introdujeron los parámetros ya antes mencionados.

#### Temporada de Secas

En la Figura 2.6 se pueden visualizar que en la calibración se considera el balance de masa que se proporciona en los resultados de la corrida del modelo como Percent Discrepancy, en este caso, cero. Además, en el Cuadro 2.1 se muestra el valor de los parámetros calculados y simulados, así como el cálculo del error absoluto porcentual para los valores simulados. Finalmente, en la Figura 2.5, se presenta el resultado de las cargas hidráulicas, donde se visualiza la dirección de flujo hacia el Valle, esto se asocia a que es la zona con menor elevación topográfica.

PARÁMETRO	CALCULADO[m <sup>3</sup> /d]	SIMULADO [m <sup>3</sup> /d]	% ERROR
RECHARGE	736986.30	732501.44	0.61
RIVER LEAKAGE	56712.33	56971.26	0.46
GHB	480273.97	484238.19	0.83
DRAINS	9041.10	9450.52	4.53
ET	160547.95	162032.87	0.92

Cuadro 2.1: Porcentaje de error para la calibración en Estado Estacionario de la temporada de Secas.

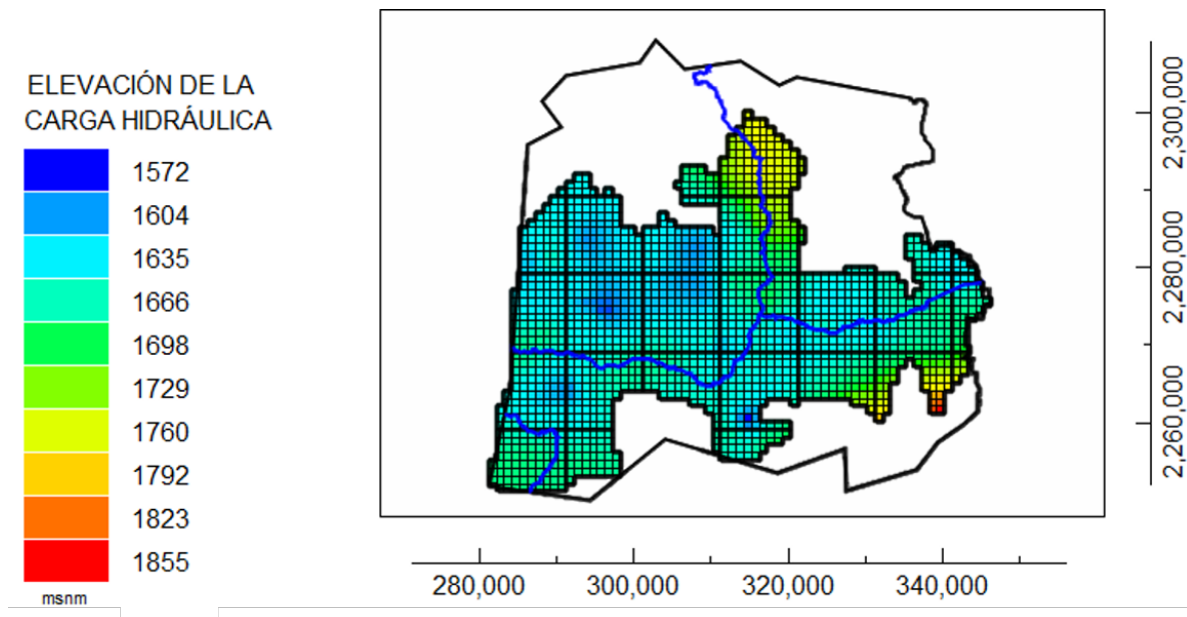


Figura 2.5: Cargas hidráulicas en Estado Estacionario de la temporada de Secas, donde la mayor carga se representa por el color rojo y la menor carga por el azul oscuro.

```

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1, STRESS PERIOD 1
-----
CUMULATIVE VOLUMES      L**3      RATES FOR THIS TIME STEP      L**3/T
-----
IN:
---
STORAGE =          0.0000      STORAGE =          0.0000
CONSTANT HEAD =      0.0000      CONSTANT HEAD =      0.0000
DRAINS =          9450.5234      DRAINS =          9450.5234
RIVER LEAKAGE =     56971.2617      RIVER LEAKAGE =     56971.2617
ET =              0.0000      ET =              0.0000
HEAD DEP BOUNDS =  484238.1875      HEAD DEP BOUNDS =  484238.1875
RECHARGE =       732501.4375      RECHARGE =       732501.4375

TOTAL IN =    1283161.4101      TOTAL IN =    1283161.4101

OUT:
----
STORAGE =          0.0000      STORAGE =          0.0000
CONSTANT HEAD =      0.0000      CONSTANT HEAD =      0.0000
DRAINS =          0.5234      DRAINS =          0.5234
RIVER LEAKAGE =    1122612.2500      RIVER LEAKAGE =    1122612.2500
ET =          162032.8741      ET =          162032.8741
HEAD DEP BOUNDS =  0.0000      HEAD DEP BOUNDS =  0.0000
RECHARGE =          0.0000      RECHARGE =          0.0000

TOTAL OUT =    1283160.7186      TOTAL OUT =    1283160.7186

IN - OUT =          0.6915      IN - OUT =          0.6915
PERCENT DISCREPANCY = 0.00      PERCENT DISCREPANCY = 0.00
    
```

---

Figura 2.6: Calibración en estado Estacionario de la temporada de Secas.

Los resultados de las cargas hidráulicas se presentan en términos de isolíneas, con el fin de hacer una comparativa entre la configuración de la carga hidráulica del año 2015 y la configuración de la carga obtenida por Model Muse en este mismo año, el resultado se puede visualizar en la Figura 2.7.

**COMPARACIÓN ENTRE LÍNEAS EQUIPOTENCIALES  
DE NIVEL ESTÁTICO  
EMPORADA DE SECAS 2015**

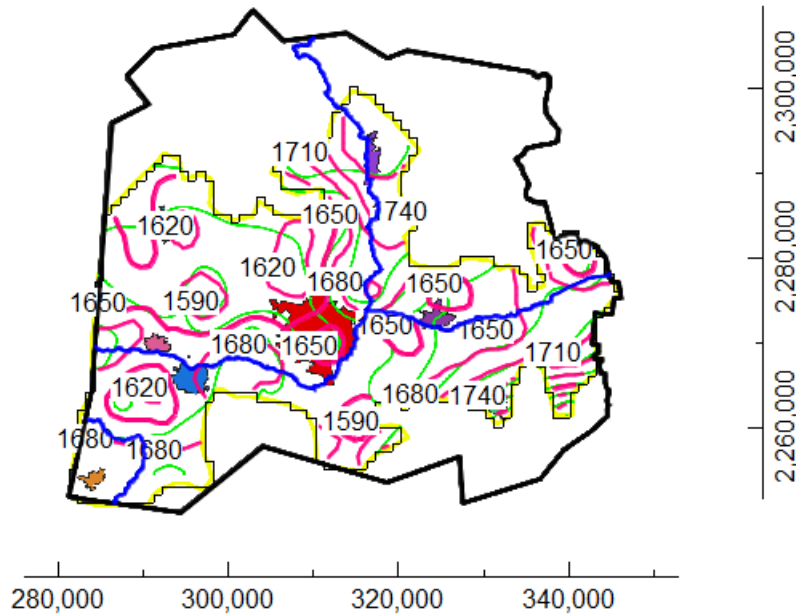


Figura 2.7: Comparación entre las líneas equipotenciales de los niveles piezométricos calculados por el modelo (Color Rosa) y los medidos en campo (Color Verde) de la temporada de Secas.

### Temporada de Lluvias

Para esta temporada se considero el mismo balance hidrico que en la temporada de secas, en la Figura 2.8 se pueden visualizar que la calibración de esta temporada considera el balance de masa con un Percent Discrepancy de cero. En el Cuadro 2.2 se muestra el valor de los parámetros calculados, simulados y el error absoluto para los valores obtenidos. Además, en la Figura 2.9, se presenta el resultado de las cargas hidráulicas resultantes, y de la misma manera que en la temporada de secas, la dirección de flujo es hacía el Valle.

PARÁMETRO	CALCULADO[m <sup>3</sup> /d]	SIMULADO [m <sup>3</sup> /d]	% ERROR
RECHARGE	784383.56	776879.24	0.96
RIVER LEAKAGE	68767.12	69445.22	0.99
GHB	552054.79	547311.89	0.86
DRAINS	11506.85	10779.52	6.32
ET	150958.90	152132.87	0.78

Cuadro 2.2: Porcentaje de error para la calibración en Estado Estacionario de la temporada de Lluvias.

```

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP   1, STRESS PERIOD   1
-----
CUMULATIVE VOLUMES      L**3      RATES FOR THIS TIME STEP      L**3/T
-----
IN:
---
STORAGE =          0.0000      STORAGE =          0.0000
CONSTANT HEAD =        0.0000      CONSTANT HEAD =        0.0000
DRAINS =       10779.5234      DRAINS =       10779.5234
RIVER LEAKAGE =   69445.2189      RIVER LEAKAGE =   69445.2189
ET =              0.0000      ET =              0.0000
HEAD DEP BOUNDS =  547311.8941      HEAD DEP BOUNDS =  547311.8941
RECHARGE =       776879.2358      RECHARGE =       776879.2358

TOTAL IN =    1404415.8722      TOTAL IN =    1404415.8722

OUT:
---
STORAGE =          0.0000      STORAGE =          0.0000
CONSTANT HEAD =        0.0000      CONSTANT HEAD =        0.0000
DRAINS =          0.0000      DRAINS =          0.0000
RIVER LEAKAGE =  1252284.4288      RIVER LEAKAGE =  1252284.4288
ET =       152132.8741      ET =       152132.8741
HEAD DEP BOUNDS =    0.0000      HEAD DEP BOUNDS =    0.0000
RECHARGE =          0.0000      RECHARGE =          0.0000

TOTAL OUT =    1404417.3029      TOTAL OUT =    1404417.3029

IN - OUT =          -1.4307      IN - OUT =          -1.4307
PERCENT DISCREPANCY =    0.00      PERCENT DISCREPANCY =    0.00
    
```

Figura 2.8: Calibración en estado Estacionario: Temporada de Lluvias

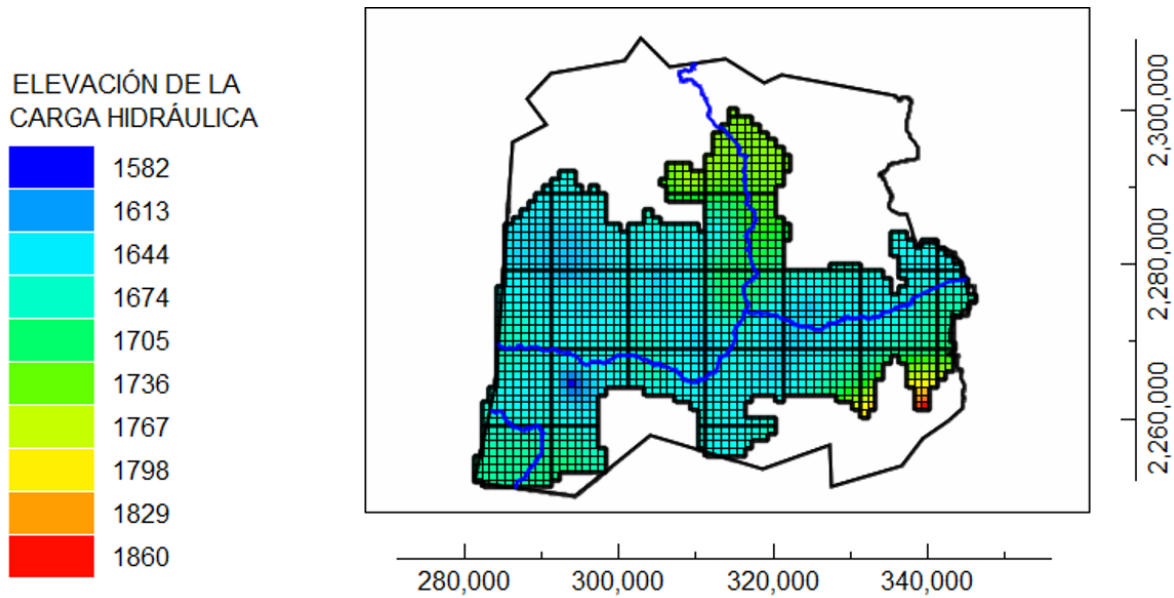


Figura 2.9: Cargas hidráulicas en Estado Estacionario de la temporada de Lluvias, donde la mayor carga se representa por el color rojo y la menor carga por el azul oscuro.

**COMPARACIÓN ENTRE LÍNEAS EQUIPOTENCIALES  
DE NIVEL ESTÁTICO  
TEMPORADA DE LLUVIAS 2010**

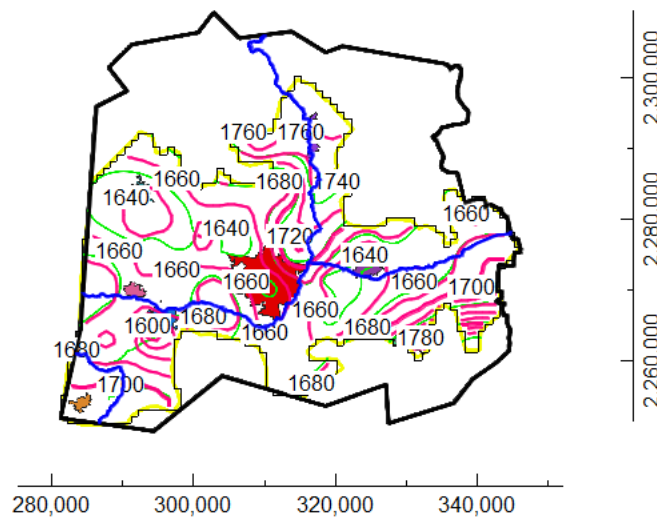


Figura 2.10: Comparación entre las líneas equipotenciales de los niveles piezométricos calculados por el modelo (Color Rosa) y los medidos en campo (Color Verde) de la temporada de Lluvias.



En la Figura 2.10 se hace una comparación entre las líneas equipotenciales de elevación del nivel estático del año 2010 calculadas por el modelo y los niveles piezométricos medidos en campo, donde se reproduce aceptablemente la configuración piezométrica del modelo.

### 2.3.6. Calibración en estado Transitorio

El estado transitorio se caracteriza por el cambio de las cargas hidráulicas a través del tiempo, es decir, existe una perturbación del funcionamiento natural del sistema. La extracción de agua por bombeo para el abastecimiento del sector agrícola, es característico de este acuífero, sin embargo, estas extracciones masivas han provocado una gran disminución del almacenamiento de agua, sometiendo al sistema a un estado de esfuerzo. Para las simulaciones del estado transitorio se definieron las cargas iniciales, se alimentaron los datos del almacenamiento y se activaron los pozos de extracción.

#### Temporada de Secas

Las condiciones iniciales que se establecieron para comenzar esta modelación fueron las cargas hidráulicas del año 2015, por tanto, se realizó una configuración de la carga inicial con las elevaciones derivadas de las mediciones en campo y la configuración que se buscó reproducir corresponde al año 2019; el periodo de simulación fue de 4 años, equivalente a 1461 días.

Como es sabido, el coeficiente de almacenamiento específico  $S_s$  es la capacidad de compresibilidad de los materiales y se obtiene dividiendo el coeficiente de almacenamiento entre el espesor del acuífero. El rendimiento específico ( $S_y$ ) es igual a la porosidad efectiva en los acuíferos libres, cuando el acuífero es semiconfinado el modelo utiliza  $S_s$ ; el valor de  $S_s$  utilizado en la simulación transitoria fue entre  $8 \times 10^{-6}$  (primera y segunda capa) y  $3.2 \times 10^{-5}$  (resto de las capas), dependiendo de la litología.

Para el caso de los volúmenes de extracción, se formó un archivo que incluyó los pozos que se encuentran extrayendo agua del acuífero, y de los cuales se conoce su régimen de operación. El valor de los caudales de extracción fue variable, alcanzando un valor máximo de 14800 m<sup>3</sup>/día.

Para llevar a cabo la calibración en estado transitorio fue necesario ajustar la conductancia del río Lerma y la conductividad hidráulica de las capas del modelo, dado que de este modo se consiguió reproducir las direcciones de flujo en el acuífero y con ello, los niveles de las cargas hidráulicas esperadas. Cabe mencionar que esta calibración se llevó a cabo mediante el método de ensayo y error; en la Figura 2.11 se visualiza la Carga Hidráulica obtenida por el modelo para el periodo 2015- 2019.

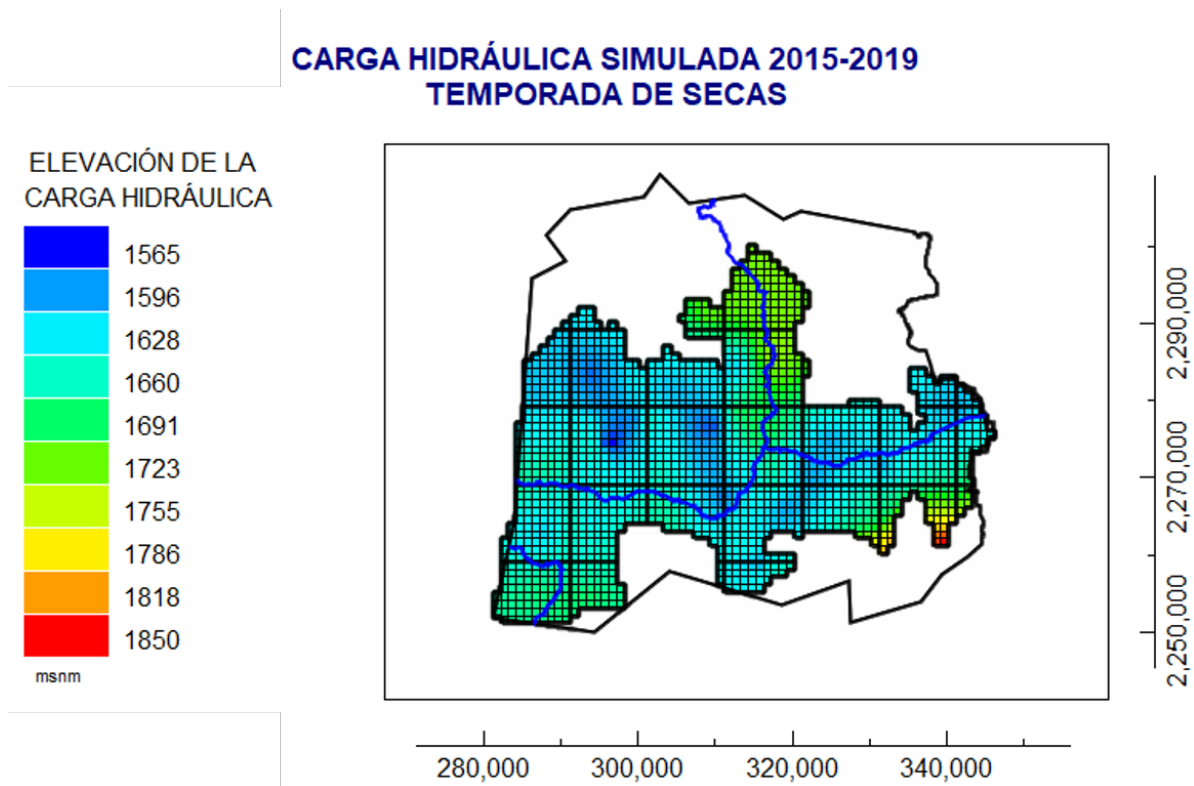


Figura 2.11: Valores de las cargas hidráulicas en estado transitorio en el intervalo de tiempo 2015-2019.

### COMPARACIÓN ENTRE LÍNEAS EQUIPOTENCIALES DE NIVEL ESTÁTICO TEMPORADA DE SECAS 2019

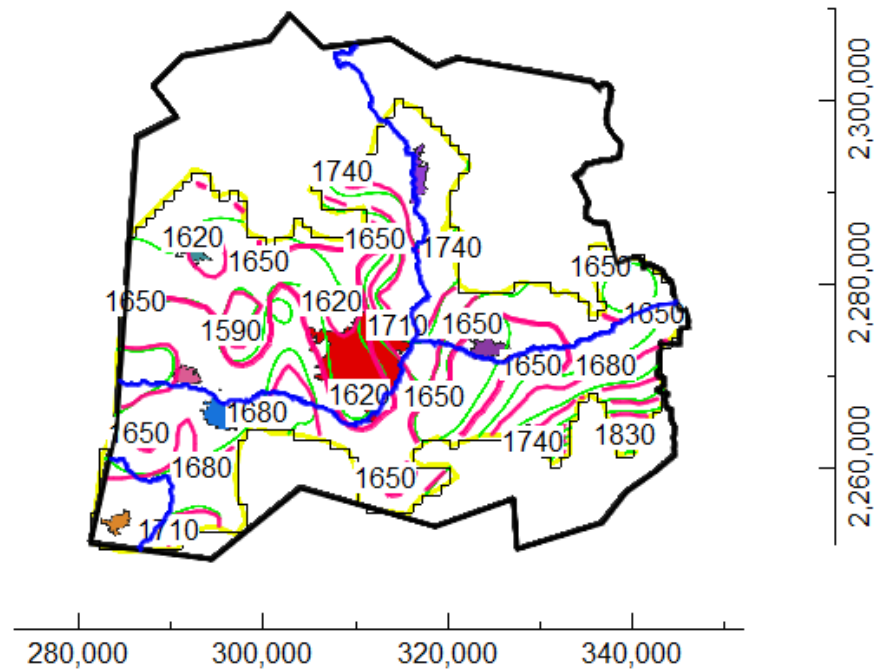


Figura 2.12: Comparación entre líneas equipotenciales de elevación de nivel estático en Temporada de Secas, 2019.

En la Figura 2.12 se visualiza la comparación entre las líneas equipotenciales del nivel estático del año 2019; la zona activa del acuífero queda delimitada por la línea amarilla, las líneas verdes corresponden a los niveles piezométricos medidos en campo, mientras que las líneas rosas son los niveles piezométricos calculados por el modelo, cualitativamente es aceptable el resultado.

Para la evaluación de los resultados de la calibración se hace un análisis cualitativo y cuantitativo, sin embargo, nunca se sabe si es suficientemente bueno el ajuste entre el modelo y la realidad, dado que hasta la fecha no existe un protocolo estándar para evaluar el proceso de calibración.

Existen diferentes criterios para evaluar la calibración de prueba y error, tales como:

- **Comparación entre mapas de contorno de las cargas medidas y simuladas.** Estos permiten establecer un estimado de la distribución espacial del error en la calibración, pero no son confiables totalmente, por ello, no deben utilizarse como la única prueba de calibración.
- **Gráfica de dispersión de las cargas medidas contra simuladas.** Cuando las cargas hidráulicas se distribuyen aleatoriamente a partir de la línea recta, muestran un ajuste calibrado.
- **Una lista que incluye las cargas medidas y simuladas junto con sus diferencias, acompañadas de algún tipo de promedio de estas diferencias.** Esta información permite informar cómo se presentan los resultados de la calibración.

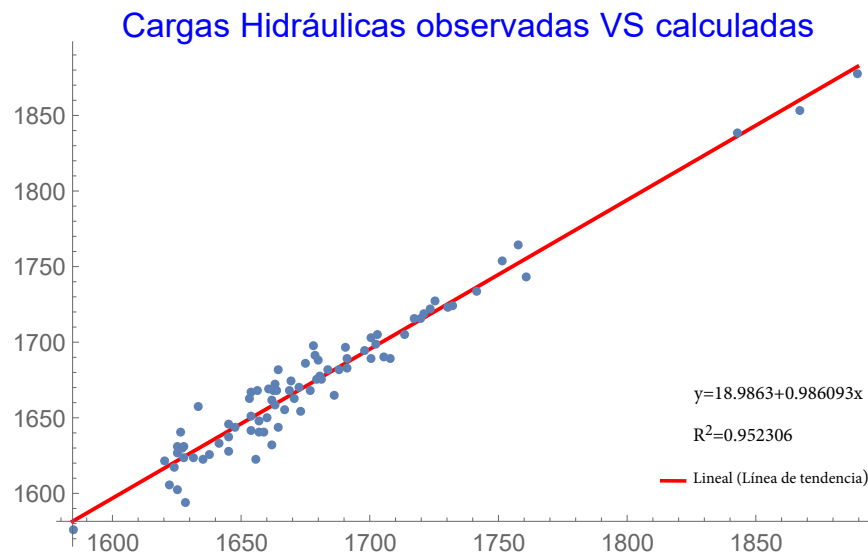


Figura 2.13: Correlación de los niveles piezométricos observados y calculados en Temporada de Secas, 2019.

En la Figura 2.13, se presenta la regresión lineal de las cargas hidráulicas, tal como lo sugiere Anderson y Woessner [36], aquí se puede ver la comparación de los datos de la carga hidráulica medida en campo contra la carga hidráulica calculada por el modelo. Adicionalmente, en la Figura 2.14, se presentan los residuos de las cargas hidráulicas observadas y simuladas.



Figura 2.14: Residuos de los niveles piezométricos observados y calculados en Temporada de Secas, 2019.

También se presenta en la Figura 2.15 una y dos veces la desviación estándar a partir de la media de nuestros niveles piezométricos calculados por el modelo; la media calculada es de 1674.39 msnm, mientras que la primera y segunda desviación estándar es  $\pm 51.30$  y  $\pm 102.6$ . En este gráfico es posible identificar 69 pozos dentro de la primer desviación estándar, mientras que en la segunda hay un total de 11 pozos, sin embargo, hay tres pozos (IGC-1040, IGC-1847 y L-132) que se localizan fuera de la segunda desviación, probablemente esto se debe a que los datos de campo reportados en estos pozos esten más observados, por tanto, se recomienda verificar la información en futuras visitas, además de realizar una actualización de las pruebas de bombeo para obtener los valores de conductividad hidráulica adecuados en la zona.

Estadística de las Cargas Hidráulicas  
Calculadas por el modelo

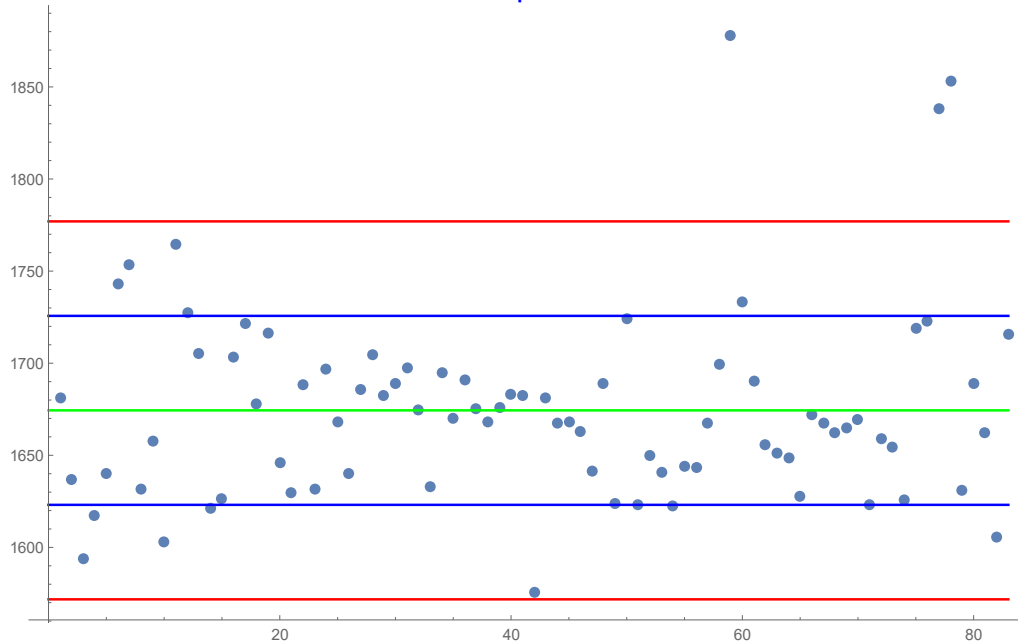


Figura 2.15: Temporada de Secas: desviación estándar de los datos calculados por el modelo a partir de la media, la  $\pm$  desviación estándar corresponde a las líneas azules,  $\pm 2$  desviaciones estándar son las líneas rojas y la media está indicada por la línea color verde.

A continuación se presentan las tres formas comunes de expresar la diferencia entre las cargas medidas y las cargas simuladas:

1.- Error medio, ME, que es la diferencia media entre las cargas medidas  $h_m$  y las cargas simuladas  $h_s$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i, \quad (2.24)$$

donde  $n$  es el número de valores utilizados en la calibración. El ME es simple de calcular, sin embargo, no siempre es una buena elección porque las diferencias positivas y negativas se incorporan en la media y pueden cancelar el error. Por tanto, un pequeño error medio puede no indicar una buena calibración.

2.- Error medio absoluto, MAE, es la media del valor absoluto de la diferencia en las cargas medidas y simuladas

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(h_m - h_s)_i|. \quad (2.25)$$

3.- Raíz del error cuadrático medio, RMS o la derivación estándar, es el promedio de las diferencias cuadráticas en las cargas medidas y simuladas

$$RMS = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(h_m - h_s)_i]^2 \right]^{0.5}. \quad (2.26)$$

Utilizando la Ec. 2.24, 2.25 y 2.26, se tiene para este caso de estudio, un ME de 4.36 m, un MAE de 9.42 m y una RMS de 11.98 m así que para esta simulación el ME proporciona el mínimo mejor definido. Es importante señalar que estas tres medidas del error, se usan para cuantificar el error promediado en la calibración, pero no expresan nada con respecto a la distribución del error.

No obstante, algunos autores como los creadores de Waterloo Hydrogeological, consideran que el RMS normalizado es una medida más representativa del ajuste que el RMS estándar, dado que representa la escala del rango potencial de los datos y se expresa como un porcentaje

$$RMS_{normalizado} = \frac{RMS}{(h_m)_{max} - (h_m)_{min}}. \quad (2.27)$$

Un error RMS normalizado menor al 10 % indica una calibración aceptable del modelo [37], para este caso de estudio, se obtuvo un RMS normalizado de 3.93 % al utilizar la Ec. 2.27.

### Temporada de Lluvias

Para esta temporada se estableció como carga inicial la configuración de las cargas hidráulicas del año 2010, esto con el fin de reproducir la configuración del año 2015 a través de un periodo de simulación de 1826 días, equivalente a 5 años. El resto de los parámetros utilizados en la simulación fueron iguales a los de temporadas de secas, a excepción de los valores de la conductancia del Río ( $912.5 \text{ m}^2/\text{d}$ ) y del canal ( $15.3 \text{ m}^2/\text{d}$ ). La calibración se llevó a cabo mediante el método de ensayo y error, en la Figura 2.17 se muestra la carga hidráulica obtenida por el modelo de 2010 a 2015; por otro lado, en la Figura 2.16 se presenta la carga en término de isolíneas comparada con los niveles estáticos medidos en campo del año 2015.

#### COMPARACIÓN ENTRE LÍNEAS EQUIPOTENCIALES DE NIVEL ESTÁTICO TEMPORADA DE SECAS 2015

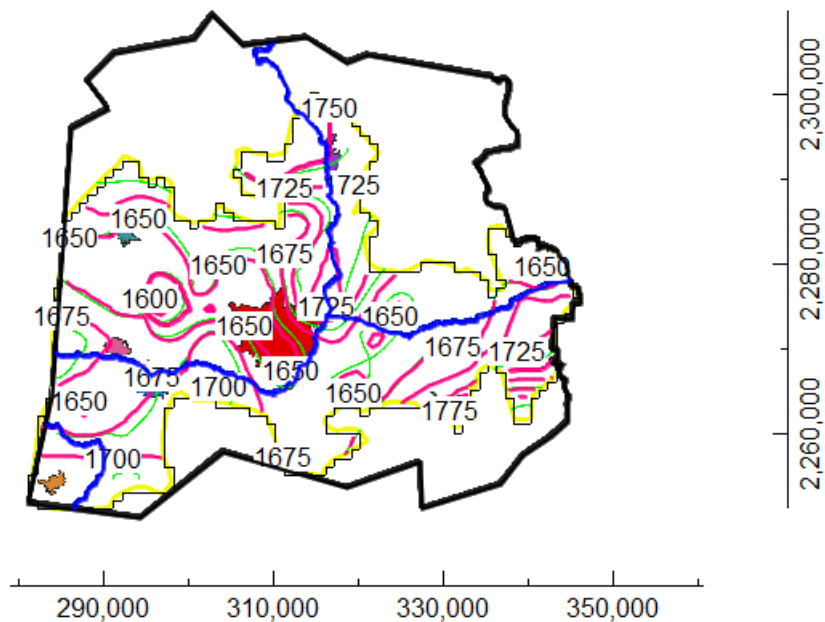


Figura 2.16: Comparación entre líneas equipotenciales de elevación de nivel estático en Temporada de Lluvias, 2015.



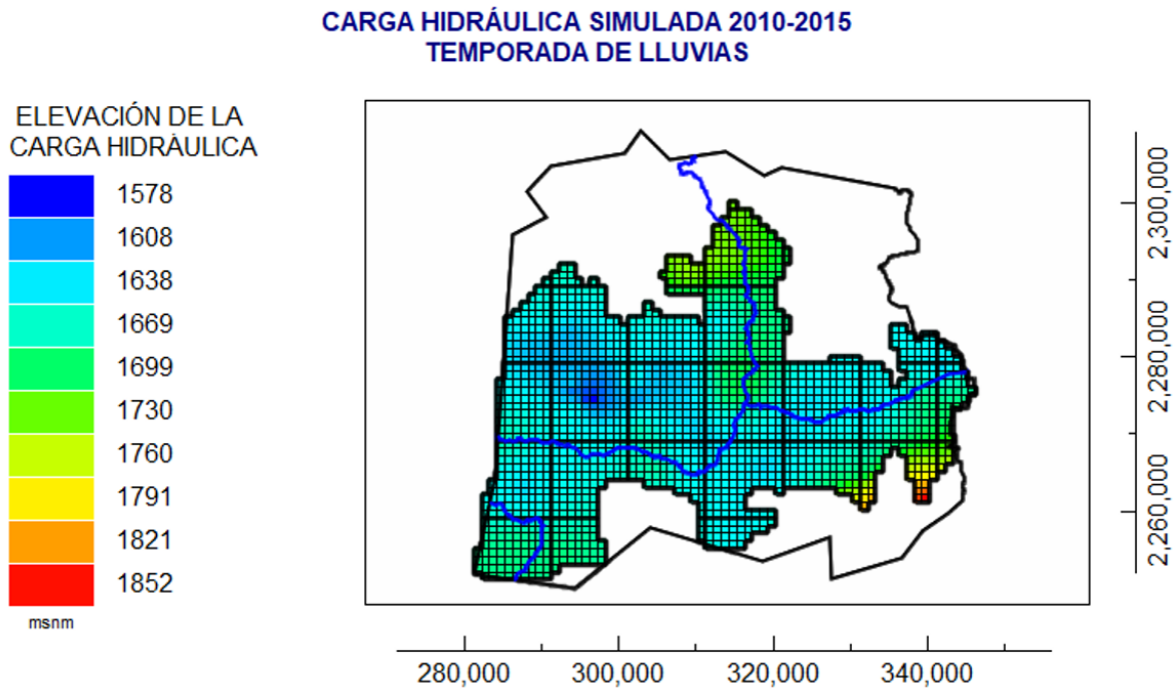


Figura 2.17: Valores de las cargas hidráulicas en estado transitorio en el intervalo de tiempo 2010-2015.

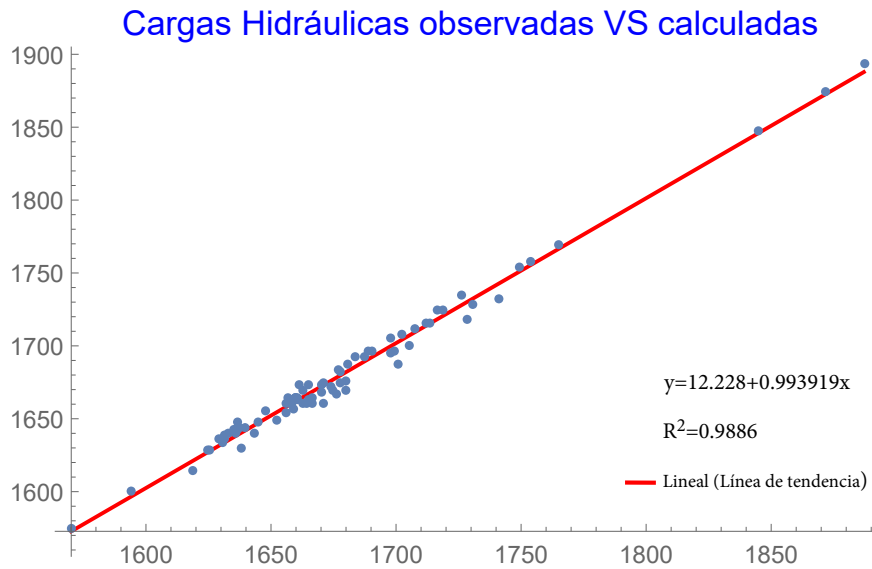


Figura 2.18: Correlación de los niveles piezométricos observados y calculados en Temporada de Lluvias, 2015.

También en esta temporada, se hace la regresión lineal de las cargas hidráulicas, en la Figura 2.18 se visualiza la comparación de los datos de la carga hidráulica medida en campo contra la carga hidráulica calculada por el modelo durante la temporada de Lluvias del año 2015, mientras que en la Figura 2.19, se presenta el grafico de los residuos de las cargas hidráulicas observadas y simuladas de este mismo año.

Como complemento al análisis estadístico se calculó la desviación estándar de los datos, ver Figura 2.20; la media calculada es de 1679.69 msnm, mientras que la primera y segunda desviación estándar es  $\pm 51.54$  y  $\pm 103.09$  respectivamente. En este análisis se utilizaron un total de 80 pozos, dentro de la primer desviación estándar hay 69, en la segunda desviación son 7 pozos, y 4 pozos (IGC-382, L-260, L325 y P-66) se localizaron fuera de la segunda desviación; por ello, estos pozos no se consideraron en las proyecciones del modelo, esto con el fin de evitar errores.

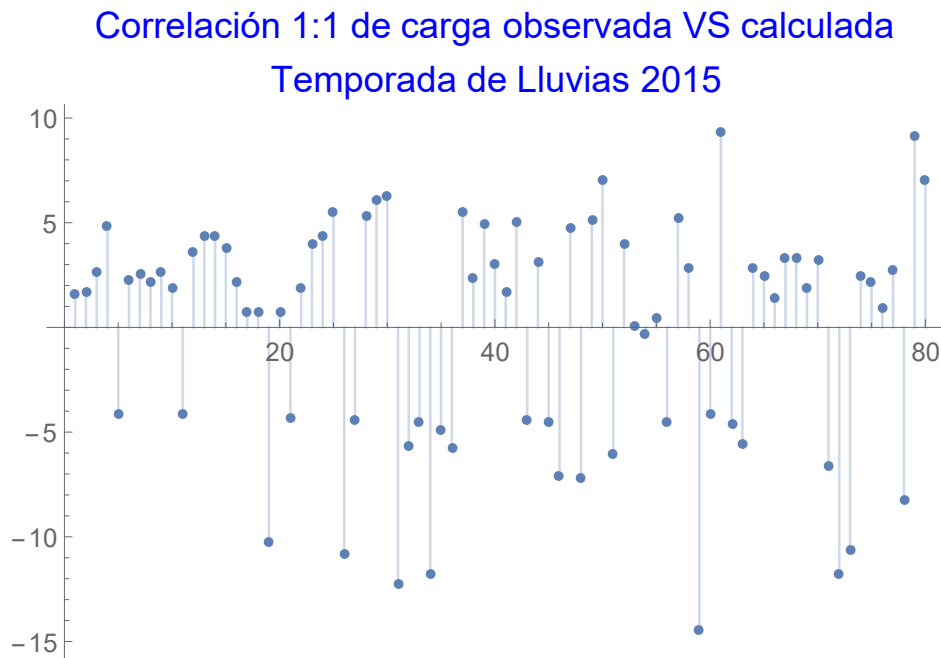


Figura 2.19: Residuos de los niveles piezométricos observados y calculados en Temporada de Secas, 2019.

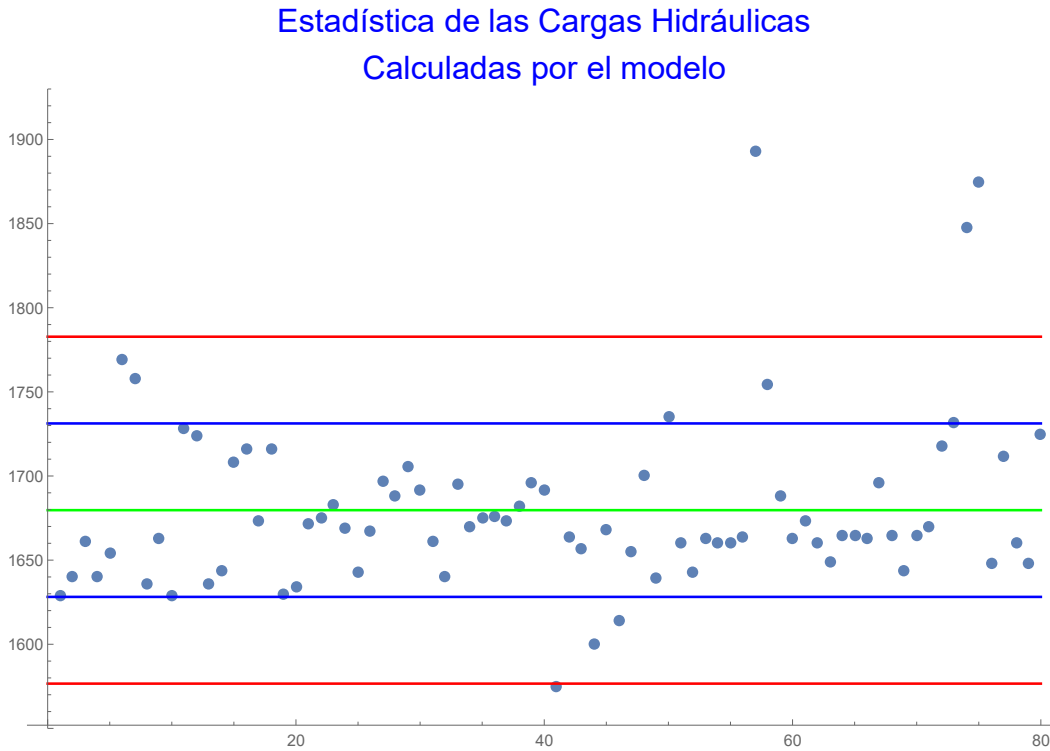


Figura 2.20: Temporada de Lluvias: desviación estándar de los datos calculados por el modelo a partir de la media, la  $\pm$  desviación estándar corresponde a las líneas azules,  $\pm 2$  desviaciones estándar son las líneas rojas y la media está indicada por la línea color verde.

Utilizando la Ec. 2.24, 2.25 y 2.26 para el cálculo del Error medio, Error medio absoluto y la Raíz cuadrática media respectivamente, se obtuvo un valor ME de 2.03, un MAE de 5.28 y una RMS de 5.84; el cálculo de la RMS normalizada fue de 1.84 % al utilizar la Ec. 2.27.

### 2.3.7. Análisis de Sensibilidad

De acuerdo con Anderson y Woeddner [36], los análisis de sensibilidad se hacen con el propósito de cuantificar la incertidumbre de los parámetros estimados, periodos de tiempo y las condiciones de frontera en el modelo calibrado. Durante el análisis de sensibilidad, se cambiaron los valores calibrados de conductividad hidráulica, Recarga,

Coefficiente de almacenamiento y rendimiento específico, del mismo modo, se realizó el análisis de sensibilidad para los valores de conductancia de las entradas, del Río y del canal, sin embargo, el rendimiento específico junto con las conductancias del río, canal y entradas, presentaron variaciones muy pequeñas por lo cual se decidió no presentarlo en el gráfico, Figura 2.21. Los rangos establecidos para realizar el análisis, fueron de  $\pm 30\%$ ,  $\pm 20\%$  y  $\pm 10\%$ .

Para este análisis se utilizó una grafica donde cada parámetro que se varió representa una serie, y se compara el RMS, en el origen el RMS es cero porque se encuentra calibrado. En la Figura 2.21 se visualiza que los parámetros que presentan mayor variación son el rendimiento específico y la conductividad hidráulica, los valores de estos parámetros tienden a cambiar relevantemente, por otro lado, el coeficiente de almacenamiento específico es el valor menos variante.

Este análisis de sensibilidad nos permite identificar y prever como es la variación de la carga hidráulica calibrada en caso de aumento o disminución porcentual de los parámetros; el parámetro de Coeficiente de almacenamiento específico tiene variaciones de  $0.028\%$  a  $0.015\%$  con respecto al intervalo de  $+30\%$  a  $-30\%$ , por lo que se considera que el rango de variación no representa ni el  $1\%$  de la variación de las cargas hidráulicas, así que este parámetro también es insensible al modelo.

Por otra parte la recarga presenta una variación en la carga hidráulica, esta alcanza hasta el  $0.9\%$ , por tanto, este parámetro si representan cambios importantes en la zona de estudio, pero es menor al de Conductividad hidráulica y rendimiento específico. Por tanto, estos dos últimos parámetros pueden llegar a modificar las cargas hidráulicas del modelo al ser muy sensible.

Análisis de Sensibilidad para Cargas hidráulicas  
Temporada se secas 2019

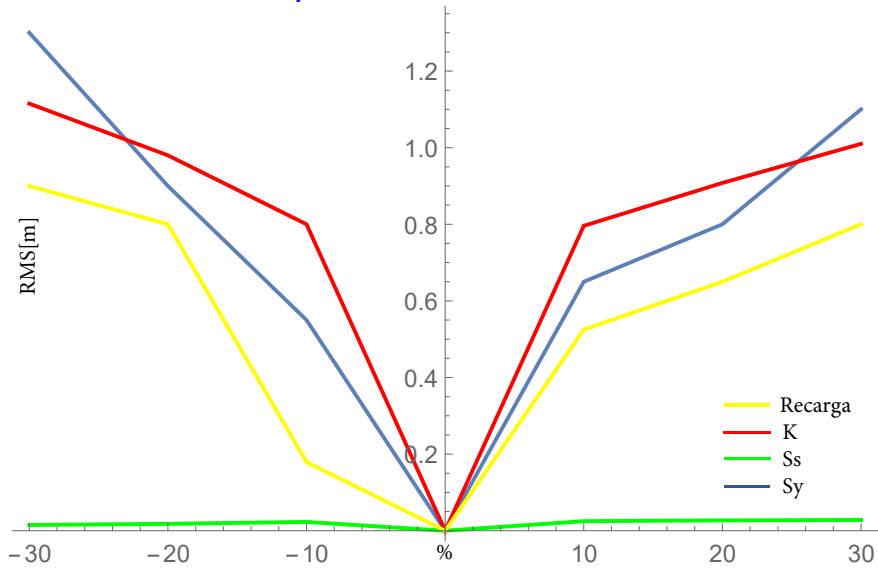


Figura 2.21: Análisis de sensibilidad para los parámetros de Recarga, Conductividad hidráulica K, Coeficiente de Almacenamiento específico Ss y Rendimiento Específico Sy.

# Capítulo 3

## Resultados

El modelo de simulación hidrodinámica que se expone en este trabajo representa el comportamiento subterráneo del acuífero Valle de Celaya, el modelo opera en estado transitorio abarcando un periodo de simulación de 15 años para la temporada en secas, comprendido de 2015 a 2030, mientras que para la temporada en lluvias es de 20 años, de 2010 a 2030, y calibrados con la información disponible para los años 2019 y 2015, respectivamente.

### 3.1. Proyección de Escenarios de Explotación

El modelo calibrado en estado transitorio es una buena herramienta para mejorar el manejo del acuífero, dado que es capaz de reproducir el comportamiento real del sistema, por tanto, a partir de este modelo, podemos determinar la posible respuesta del sistema ante acontecimientos que alteran el funcionamiento del acuífero. Aunado a lo anterior, se propusieron tres escenarios a simular, que comprenden un periodo de 2019 a 2030 para temporada de secas y de 2015 a 2030 para la temporada de lluvias, es decir las proyecciones de ambas temporadas arrojan las cargas para el año 2030.

**Escenario 1: Tendencial.** En este escenario se simuló el modelo sin ningún tipo de modificación, es decir, se continua con el actual ritmo de extracción de agua hasta el año 2030. Así que no se ejerce ninguna modificación sobre los componentes hidrológicos, esto con el fin de estimar y observar el comportamiento de los niveles piezométricos.

**Escenario 2: Aumento de bombeo.** Actualmente existe un alta demanda poblacional en la zona urbana, principalmente en Celaya y Juventino Rosas, lo cual indica mayor demanda de recurso hídrico, principalmente subterráneo, por ello, en este escenario se simuló un incremento de 25 % en extracciones por bombeo en todos los sectores que extraen agua de este acuífero. En este escenario se simula una situación desfavorable en la región.

**Escenario 3: Reducción de bombeo.** Este acuífero cuenta con un déficit en la disponibilidad de agua, y se sabe que la CEAG está tomando medidas para controlar esta problemática y posteriormente darle solución, por ende, se dispuso a simular una reducción del 50 % en el bombeo para todos los sectores que extraen: agrícola, publico-urbano, industrial y otros; la finalidad de este escenario es minimizar el efecto que ejercen las extracciones masivas por bombeo en el acuífero y simular una situación favorable para la región.

Cabe señalar que se establecieron dos zonas para poder describir de manera más detallada el comportamiento hidrodinámico del acuífero, estas zonas son las áreas que presentan mayores abatimientos, por ello, es importante el monitoreo detallado. La Zona A se ubica entre los municipios de Juventino Rosas, Villagrán y Celaya, además, se utilizaron 8 pozos de control para su análisis, estos son IGC-1004 (1), IGC-1298 (2), IGC-1768 (3), IGC-726 (4), IGC-766 (5), IGC-769 (6), IGC-787-A (7) y IGC-789 (8). La Zona B se localiza entre Celaya, Comonfort y Apaseo el Alto y los pozos utilizados para el análisis fueron IGC-1084 (1), IGC-541 (2), L-1119 (3), L-159 (4), L-183 (5), L-184 (6), L-597 (7) y L-766 (8), esto aplica para cada escenario presentado.

## 3.2. Escenario 1: Tendencial

### 3.2.1. Temporada de Secas

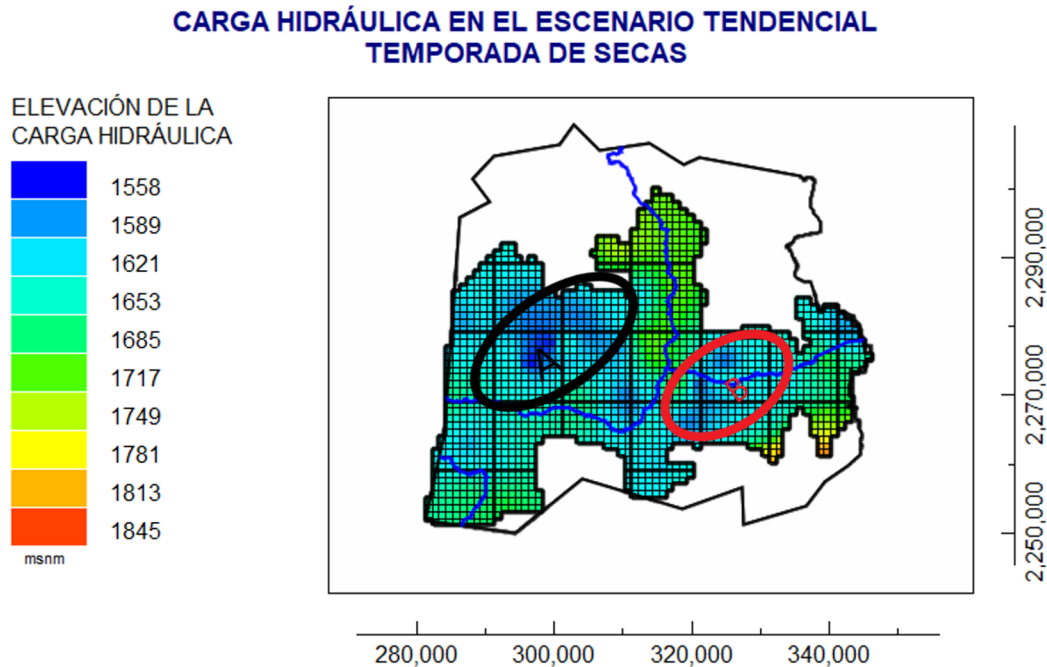


Figura 3.1: Elevación de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Tendencial en la Temporada de Secas.

Las Figuras 3.1 y 3.2, muestran la configuración de la carga hidráulica obtenida para el escenario tendencial, se observa que los niveles piezométricos disminuyen para el año 2030, a razón de metros. En la Zona A, donde están reportado por la CONAGUA y la CEAG hundimientos del terreno a causa de extracción masivas de agua subterránea, se visualiza que el cono de abatimiento se ha vuelto más pronunciado, es decir hay disminución del nivel piezométrico y el cono se ha alargado con dirección noreste, respecto al año 2019, se abate desde 3.3 m hasta los 40 m. Por otro lado, en la Zona B, se observan también abatimientos considerables que van de 20 m hasta 40 m.



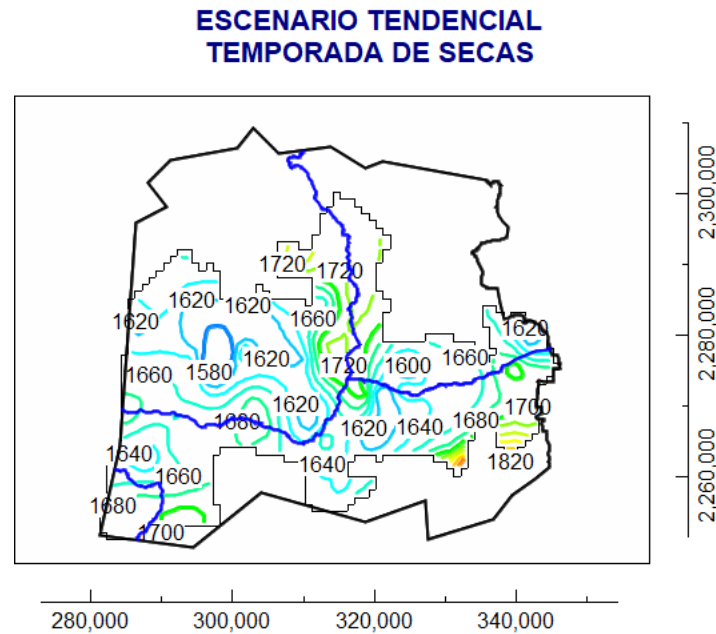


Figura 3.2: Isolíneas de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Tendencial en la Temporada de Secas.

En la Figura 3.3(a) se observan algunos puntos de control que se seleccionaron para reconocer el comportamiento de las cargas hidráulicas de la Zona A, la línea roja corresponde a las variaciones de la carga hidráulica del periodo 2019-2030, es decir, se calculó la diferencia de cargas de la simulación del año 2019 con la del 2030, a excepción de dos pozos: IGC-1046 y IGC-1298, las cargas hidráulicas disminuyen conforme transcurre el tiempo, esto se puede asociar a que los puntos de control utilizados, son representativos de las zonas donde hay grandes abatimientos. La línea azul representa la diferencia de carga del año 2015 y 2019, y en este periodo, todavía es posible ver variaciones de carga tanto positivas como negativas.

En la Figura 3.3(b) se visualizan los puntos de control para la Zona B, el comportamiento de los pozos en el periodo 2019-2030 es similar a los de la Zona A, es decir, estos pozos pierden carga con el paso de los años, mientras que para el periodo 2015-2019, únicamente cuatro pozos estaban en declive, el resto se recuperaron.

En términos generales, las líneas equipotenciales siguen conservando similitud con respecto a la configuración de la carga hidráulica de 2019, simplemente los conos que se tenían en este año se han alargado más y han aumentado sus profundidades principalmente en la Zona A y B, el resto del acuífero tiene un comportamiento semejante al año 2019.

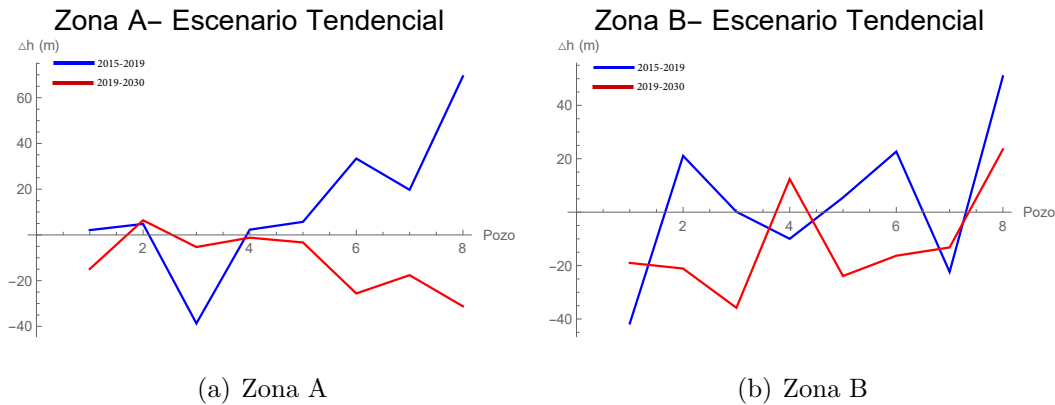


Figura 3.3: Variación de la carga hidráulica en el escenario Tendencial de la Temporada de Secas.

### 3.2.2. Temporada de Lluvias

Se puede observar la configuración de la carga hidráulica proyectada al año 2030 en las Figuras 3.4 y 3.5; es notorio que al hacer la comparación con la temporada de secas, los niveles piezométricos aumentan unos cuantos metros. En la Zona A, aún se logra ver el cono de abatimiento, es de suponerse que aunque haya más recarga en el acuífero no es suficiente para lograr recuperación en todo el acuífero, sin embargo, en la Zona B, ya no es tan visible la formación de los conos de abatimiento, la temporada de lluvias beneficia específicamente esta zona.

**CARGA HIDRÁULICA EN EL ESCENARIO TENDENCIAL  
TEMPORADA DE LLUVIAS**

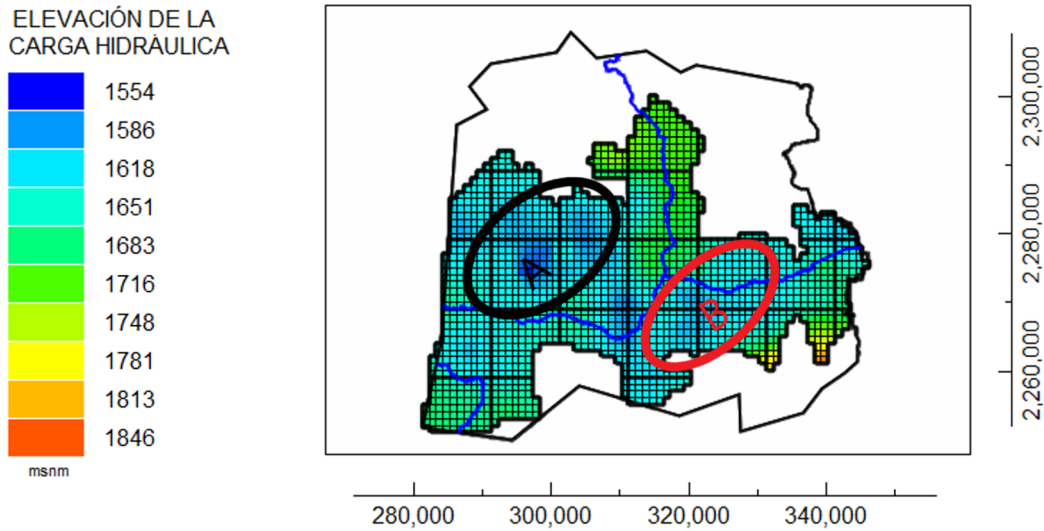


Figura 3.4: Elevación de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Tendencial en la Temporada de Lluvias.

**ESCENARIO TENDENCIAL  
TEMPORADA DE LLUVIAS**

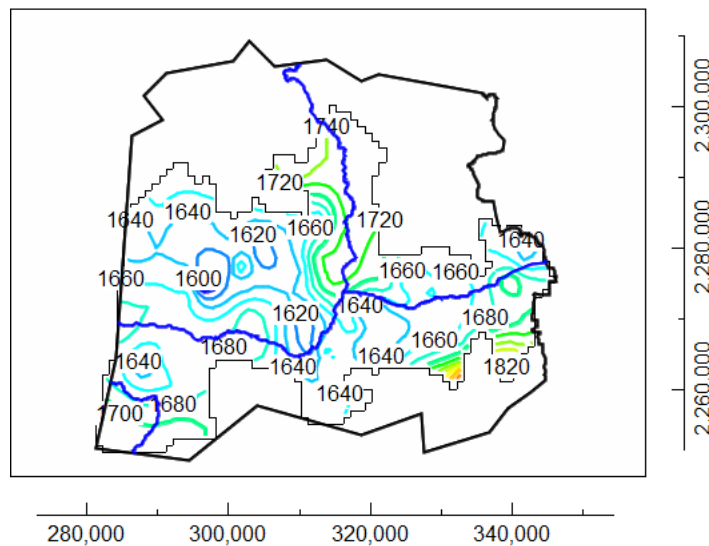


Figura 3.5: Isolíneas de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Tendencial en la Temporada de Secas.

### 3.3. Escenario 2: Aumento de bombeo

#### 3.3.1. Temporada de Secas

Se puede visualizar en las Figuras 3.6 y 3.7 la configuración de la carga hidráulica obtenida para el escenario 2, correspondiente al aumento de bombeo al 25 %, esto aplica para cualquier tipo de uso que se le da a las extracciones (Agrícola, Publico Urbano, Industrial, Otros).

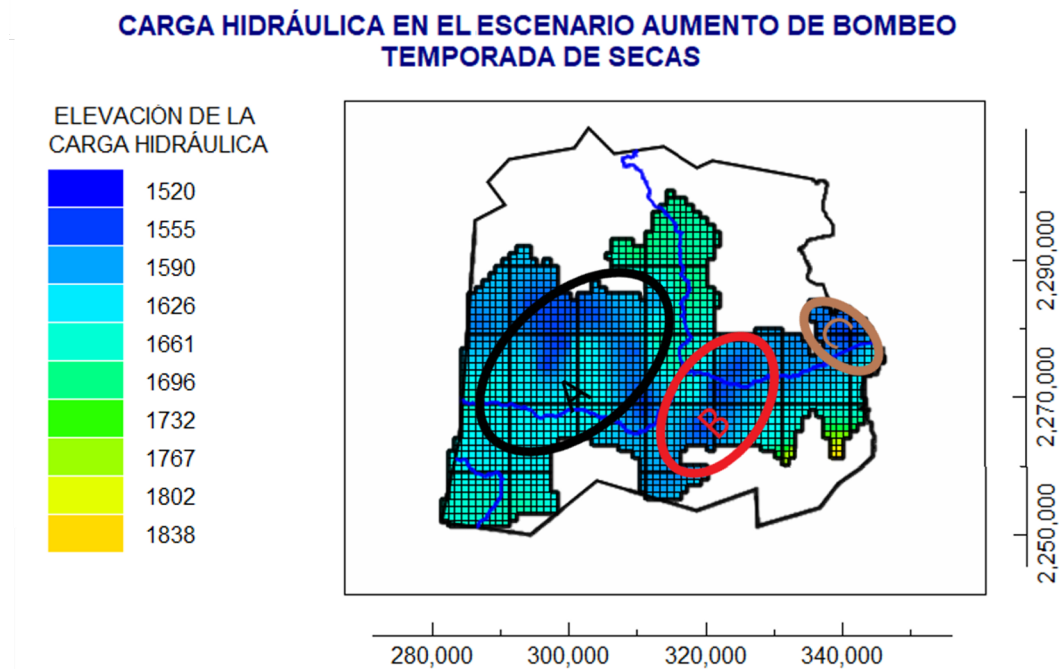


Figura 3.6: Elevación de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Aumento de Bombeo en la Temporada de Secas.

La Zona A se vuelve extremadamente vulnerable al aumentar el bombeo, se puede notar que el cono de abatimiento se ha extendido con dirección a Celaya y por ende, hay una disminución de la carga hidráulica en el resto del acuífero, la disminución va de 20 m a 60 m. La Zona B, no muestra recuperación alguna de la carga hidráulica con respecto al año 2019, la disminución de la carga hidráulica alcanza 70 m.

También es posible ver una nueva área, denominada Zona C, está localizada al noreste de Comonfort, justo en la frontera con el estado de Querétaro, donde es posible ver la disminución de carga, por ende, la formación de un nuevo cono de abatimiento que no se veía en la proyección tendencial.

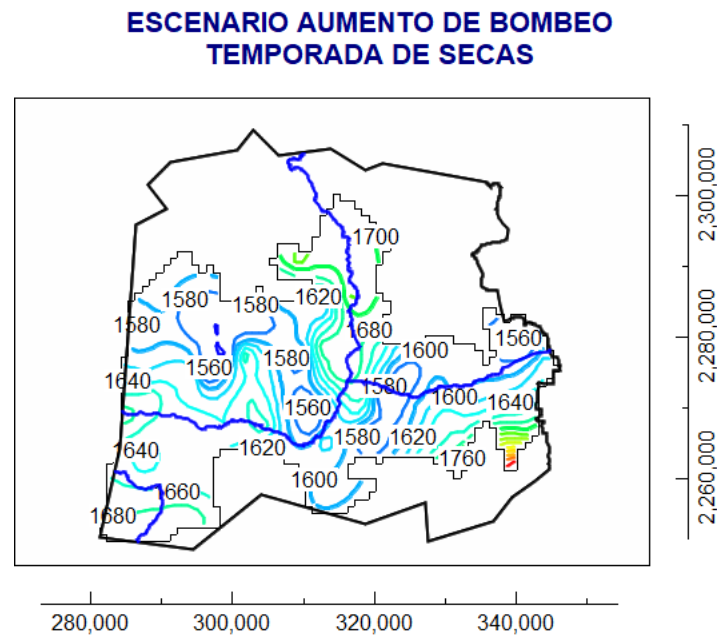


Figura 3.7: Isolíneas de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Aumento de Bombeo en la Temporada de Secas.

En la Figura 3.8(a) podemos visualizar el comportamiento de los puntos de control de la Zona A y al hacer la comparación del periodo 2015-2019 con 2019-2030, es claro ver recuperación en el primer periodo, mientras que en el segundo periodo en esta zona únicamente ha habido reducciones que sobrepasan los 50 m en tan solo 11 años.

La Figura 3.8(b) muestra los puntos de control para la Zona B, el comportamiento de los pozos en el periodo 2019-2030 es similar a los de la Zona A, no se presenta recuperación y las pérdidas ascienden hasta los 70 m. Adicionalmente a la Zona A y B, se puede reconocer una nueva zona en la que comienza a formarse un cono de abatimiento al límite noreste del acuífero, este alcanza una cota de 1560 msnm.

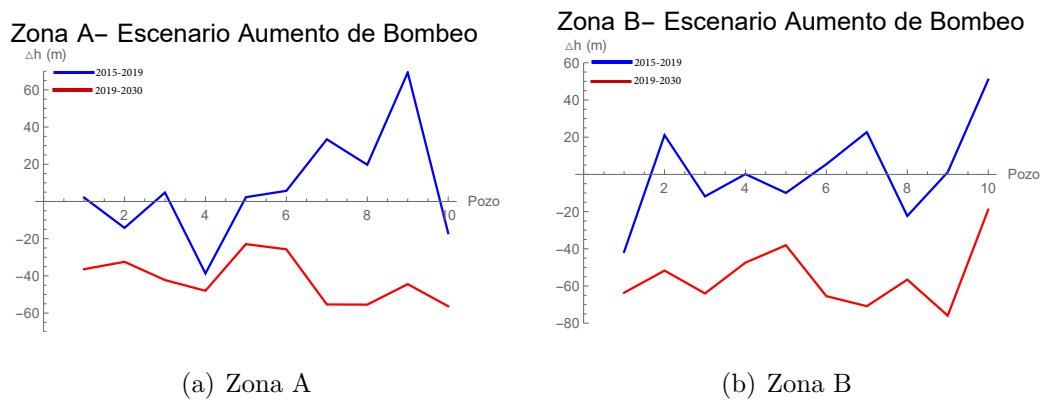


Figura 3.8: Variación de la carga hidráulica en el escenario Aumento de Bombeo de la Temporada de Secas.

### 3.3.2. Temporada de Lluvias

La proyección de la carga hidráulica para el año 2030 en el escenario Aumento de Bombeo se puede visualizar en las Figuras 3.9 y 3.10; haciendo la comparación con la temporada de Secas, se establece que el comportamiento de la carga hidráulica entre ambas temporadas varía de los 4 a los 20 m, pero también en esta temporada sigue habiendo abatimientos considerables, por ejemplo, en la Zona A, el cono de abatimiento se encuentra alargado de oeste a este, en la Zona B, el abatimiento se extiende desde el suroeste de Celaya hasta el norte de Comonfort; mientras que en la Zona C, al igual que en la temporada de Secas, se ha formado un nuevo cono de abatimiento.

**CARGA HIDRÁULICA EN EL ESCENARIO AUMENTO DE BOMBEO  
TEMPORADA DE LLUVIAS**

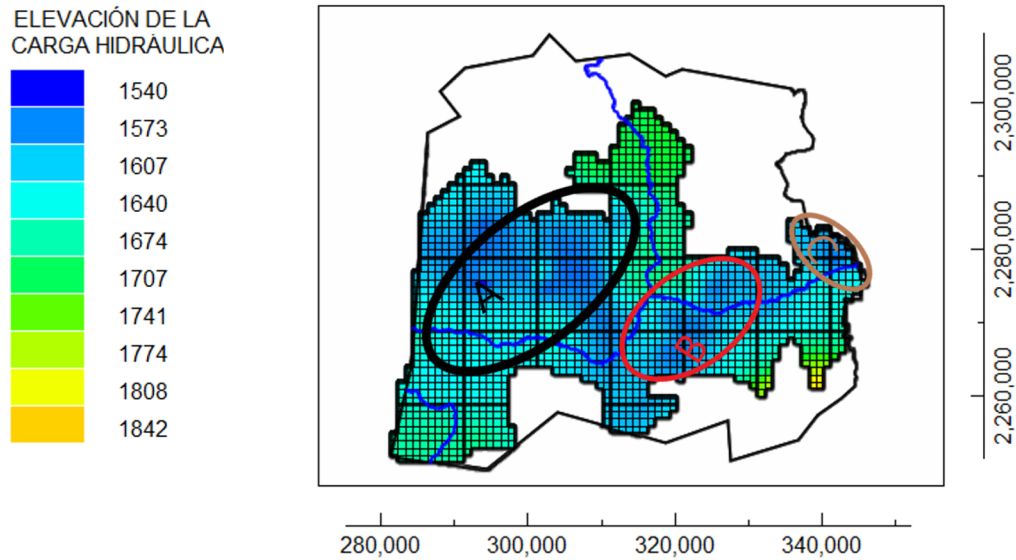


Figura 3.9: Elevación de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Aumento de Bombeo en la Temporada de Lluvias.

**ESCENARIO AUMENTO DE BOMBEO  
TEMPORADA DE LLUVIAS**

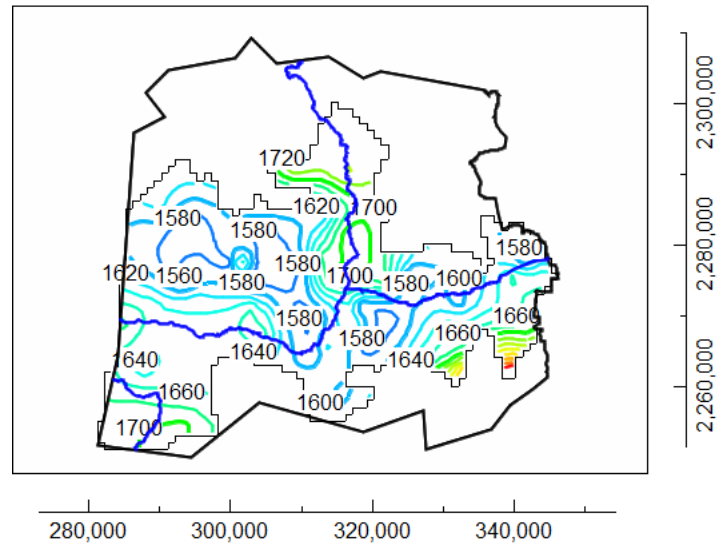


Figura 3.10: Isolíneas de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Aumento de Bombeo en la Temporada de Lluvias.

### 3.4. Escenario 3: Reducción de bombeo

#### 3.4.1. Temporada de Secas

Tal como se tiene documentado, la principal fuente de extracción de este acuífero se da mediante el bombeo y este escenario ha demostrado que gran parte de la recuperación de este acuífero depende de la reducción de extracciones para diversas actividades.

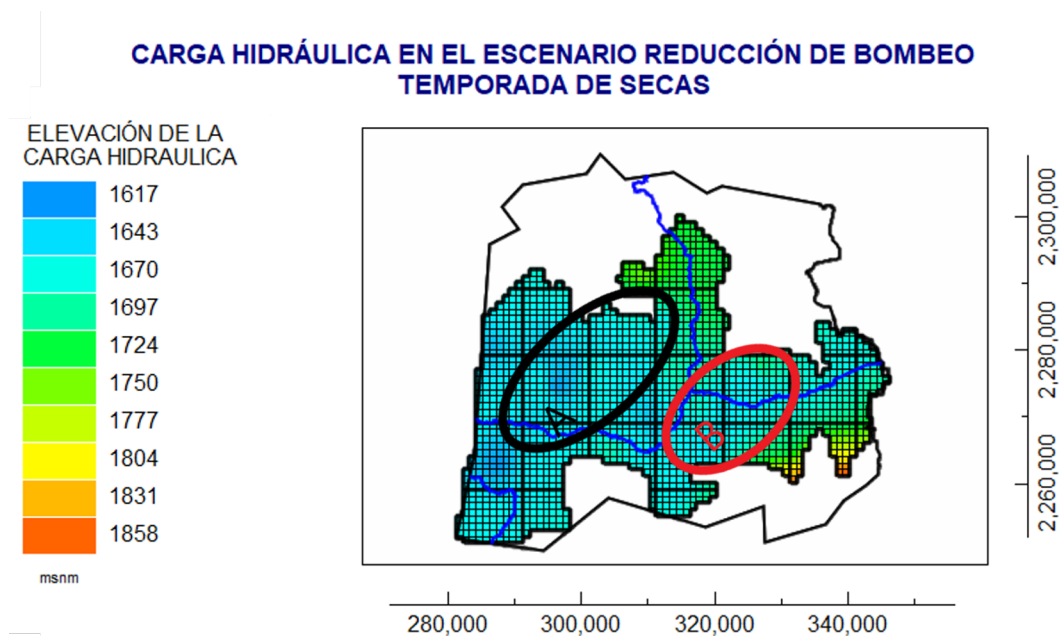


Figura 3.11: Elevación de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Reducción de Bombeo en la Temporada de Secas.

En la Figura 3.11 y 3.12 se puede ver que el cono localizado en la Zona A todavía está presente, sin embargo, este ha disminuido su extensión y ya no es tan notable como en el año 2019 y en la Zona B, podemos notar que el comportamiento del cono ha cambiado, ya no es tan pronunciado, esto a causa de la recuperación en general del acuífero.



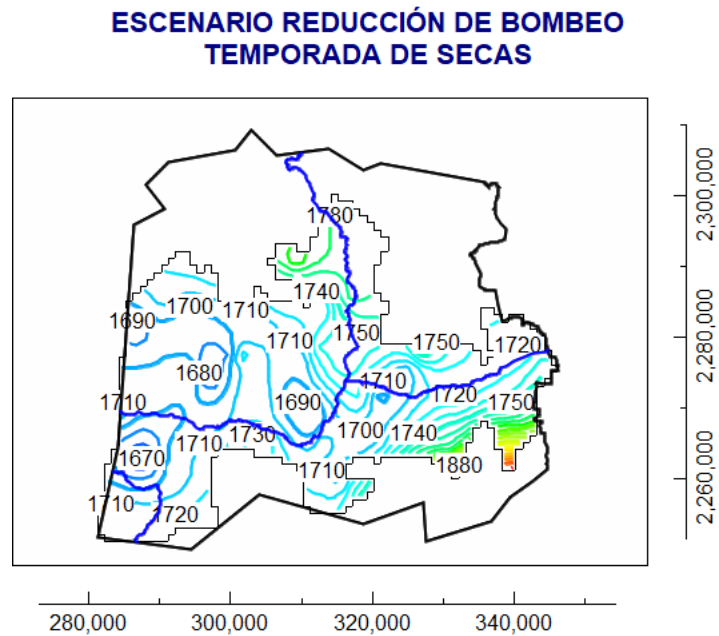


Figura 3.12: Isolíneas de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Reducción de Bombeo en la Temporada de Secas.

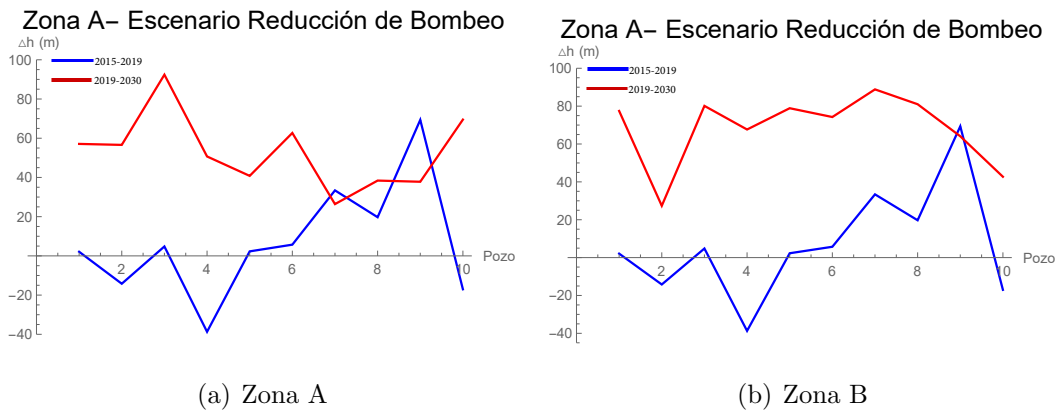


Figura 3.13: Variación de la carga hidráulica en el escenario Reducción de bombeo de la Temporada de Secas.

Entre Jaral del Progreso y Cortázar se visualiza un pequeño cono, Figura 3.12, delimitado por una cota de 1670 msnm, es posible que con la tendencia de reducción de bombeo, esta zona del acuífero pueda llegar a recuperarse.

En la Figura 3.13(a) podemos ver una situación favorable en el comportamiento de los puntos de control de la Zona A, la zona donde actualmente hay abatimientos, con esta tendencia tienden a recuperarse, y la recuperación máxima de los niveles de agua alcanzan los 90 m, mientras que la recuperación mínima es de 25 m, esto es un buen resultado para el resto del acuífero en el segundo periodo. La Figura 3.8(b) muestra recuperación en los puntos de control para la Zona B, la máxima y mínima recuperación de esta zona es de 80 m y 20 m, respectivamente.

### 3.4.2. Temporada de Lluvias

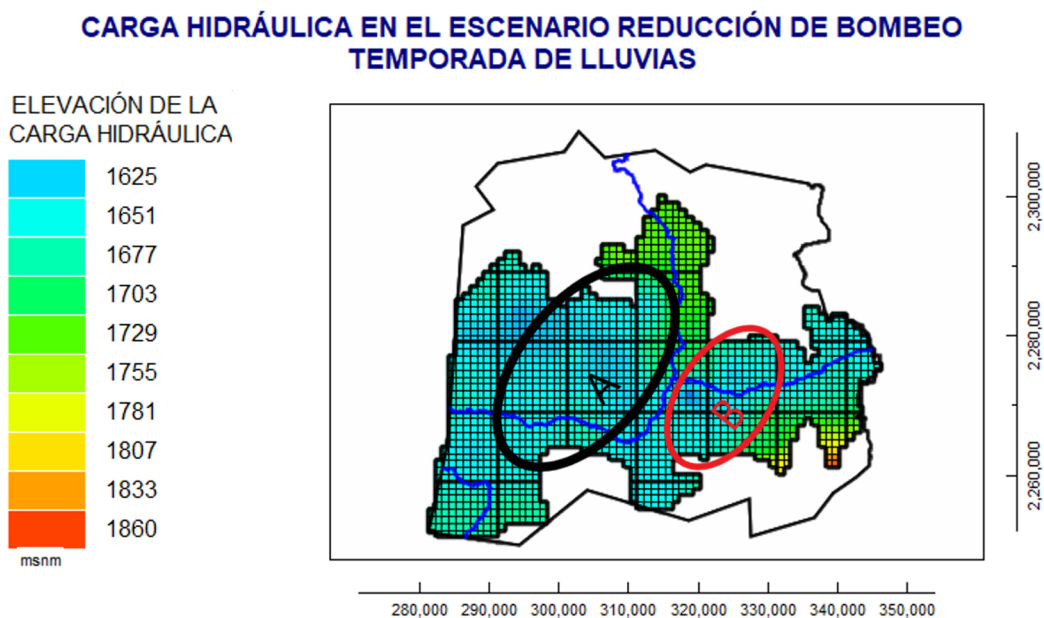


Figura 3.14: Elevación de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Reducción de Bombeo en la Temporada de Secas.

Tal como se describe en la temporada de Secas, la recuperación del acuífero en esta proyección es notablemente visible, ver Figura 3.14 y 3.15; en la Zona A todavía existe el cono de abatimiento, sin embargo, la elevación de la carga hidráulica ha aumentado a 1650 msnm, y con esta tendencia, en los próximos años es posible una recuperación

parcial del área. En la Zona B, podemos visualizar la reducción de abatimiento, por ende, la dirección del flujo sigue su trayectoria hasta el Valle. La zonas de Recarga en el acuífero siguen marcadas al norte de Apaseo el Grande y al este de Apaseo el Alto.

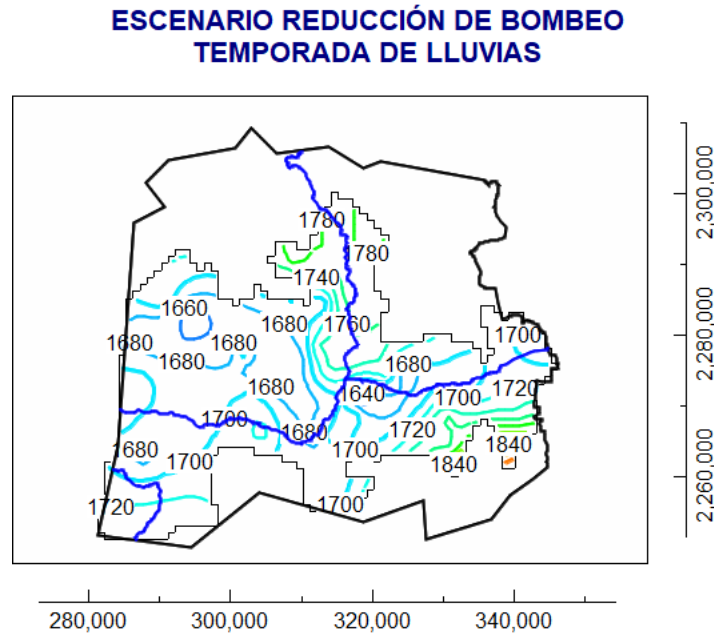


Figura 3.15: Isolíneas de la carga hidráulica del año 2030 a través del escenario Reducción de Bombeo en la Temporada de Secas.

### 3.5. Análisis general de los escenarios de simulación

A través de los diferentes escenarios simulados, se ha determinado que la evolución de la carga hidráulica muestra abatimientos, principalmente, en las zona A y B, es decir, parte del problema relacionado a los descensos del nivel estático se deben a las extracciones masivas de agua por bombeo. La proyección tendencial para el año 2030 en el acuífero es preocupante, dado que se han identificado dos zonas altamente vulnerables a abatimientos, donde la elevación mínima que alcanza la carga hidráulica es de 1579 msnm en temporada de secas y 1580 msnm en la temporada de lluvias, lo cual indica que año con año seguirá disminuyendo, y será no sustentable a largo plazo.

La zona A y B se definen como áreas más vulnerables en el acuífero, mientras que el este del acuífero hay más estabilidad de la carga hidráulica, independientemente de la proyección utilizada, sin embargo, no se descarta la posibilidad de hacer una nueva evaluación de la asignación de los parámetros hidrogeológicos utilizados en este modelo con el fin de corroborar los resultados obtenidos.

La simulación de la temporada de Secas y Lluvias han servido para hacer una comparación del compartamiento de la carga hidráulica cuando hay mayor cantidad de entradas de agua al acuífero y de como se comportan las líneas de flujo en cada situación. Con las proyecciones se ha identificado que la variación del nivel estático entre ambas temporadas es en promedio 5 m, eso significa que el acuífero, en algunos meses (junio, julio, agosto) presenta mayor carga, y en los meses más secos (marzo, abril, mayo) hay mayor descenso de carga hidráulica.

# Capítulo 4

## Conclusiones

El historial piezométrico proporcionado por la CEAG ha permitido analizar, a través de la modelación, la zona de potencial hidráulico del acuífero Valle de Celaya, además la configuración de la carga hidráulica refleja los cambios de dirección en las líneas equipotenciales entre cada periodo de simulación, por ende, es posible determinar el comportamiento del sistema, a través de los resultados proporcionados por el modelo.

El diseño del modelo conceptual de capas utilizado, se elaboró a partir de la recopilación de datos en informes técnicos de la CONAGUA, CEAG y SGM dada la falta de cortes litológicos para la reconstrucción del subsuelo. Por ello, se sugiere detallar el modelo conceptual hidrogeológico por medio de estudios de pozos profundos y/o exploración geofísica.

Se calcularon las componentes del balance hidrogeológico en este trabajo, uno para la temporada de Secas cuyo resultado fue un déficit de  $-170 \text{ Mm}^3/\text{año}$  y otra para la temporada de Lluvias, este también con un déficit de  $-118.3 \text{ Mm}^3/\text{año}$ . Esto indica que las salidas son mayores a las entradas y el acuífero presenta graves problemas de sobreexplotación.

Se realizó la calibración en estado estacionario de la temporada de Secas del año 2015 y se simuló hasta el año 2019, mientras que, en la temporada de lluvias, la calibración estacionaria fue del año 2010 y se simuló hasta el año 2015; estos resultados fueron verificados con la piezometría medida en campo, posteriormente se realizaron las proyecciones hasta 2030 en ambas temporadas, por tanto, la configuración de la carga hidráulica de la temporada de secas fue comparada con la temporada de lluvias en dos periodos: 2015 y 2030.

La elevación de la carga hidráulica mínima alcanzada en la temporada de Secas del año 2015 fue de 1572 msnm, mientras que en la temporada de Lluvias fue de 1585, difiriendo 13 metros entre temporadas del mismo año; en cuanto a las zonas de recarga se identifican en ambas temporadas, la entrada por el norte de Apaseo el Grande y por el Sureste del acuífero. En la temporada de lluvias se distingue el abatimiento de la zona localizada entre Celaya, Juventino Rosas y Villagrán, mientras que en la temporada de Secas, adicionalmente a esta zona, se visualiza un cono de abatimientos al sur de Celaya, definido con una cota de 1590 msnm, cosa que no se logra ver en la temporada de lluvias.

Al año 2030, ambas temporadas reflejan dos zonas altamente vulnerables ante las extracciones masivas de agua en el acuífero, estas están identificadas como Zona A y B, la Zona A en temporada de secas se abate aproximadamente 10 metros más que en la temporada de lluvias, la Zona B también se abate entre 10 y 15 metros entre ambas temporadas, siendo más favorable, como es de esperarse, en la temporada de lluvias. Las zonas de recarga más potenciales aún siguen siendo las mismas que en el año 2015.

De los escenarios propuestos, se concluye que hay dos zonas donde los niveles piezométricos son inestables a causa de las grandes extracciones por bombeo, por ello, es necesario reducir drásticamente la cantidad de pozos de bombeo, mínimo al 50 %, este porcentaje es muy alto, pero con esta reducción si es posible comenzar a ver recuperación en el sistema, un porcentaje menor de reducción de bombeo no mejora el déficit en el acuífero, eso sí, se debe tener en cuenta que el bombeo no es la única

causa que reduce la carga hidráulica en el acuífero, pero si mejora considerablemente los abatimientos, principalmente en la Zona A y B.

El acuífero se encuentra sometido a sobreexplotación por dos razones fundamentales, las entradas al sistema son menores a las salidas y los niveles piezométricos se muestran muy variables, desde el año 2013, por ende, su tendencia es inestable al paso del tiempo.

Se logró reproducir en el modelo de simulación, el comportamiento hidráulico de los niveles piezométricos, de manera aceptable en ambas temporadas, pudiendo proceder a realizar diferentes escenarios de simulación hasta el año 2030.

Para la comparación de las cargas medidas en campo y las estimadas por el modelo, se utilizó como criterio para evaluar la calibración del modelo, obteniendo a través de la estadística un error medio  $ME=4.36$  m, un error medio absoluto  $MAE=9.42$  m, un error cuadrático medio  $RMS=11.98$  m y un error cuadrático medio normalizado  $nRMS=3.93\%$  m para la temporada de Secas del año 2015, por otro lado, en la temporada de Lluvias del año 2010 se obtuvo un  $ME= 2.03$  m, un  $MAE=5.28$  m, un  $RMS=5.84$  m y un  $NRMS=1.84\%$ .

En la temporada de Lluvias hubo cuatro pozos que se salieron de  $\pm 2$  desviaciones estándar, es decir, no se adaptaron al modelo, por ello, no fueron considerados en las proyecciones, estos fueron IGC-382, L-260, L325 y P-66, el 86 % de los pozos se localizó en la  $\pm 1$  desviación estándar y el 9 % en  $\pm 2$  desviaciones estándar. En la temporada de Secas, el 83 % de los pozos se localizaron dentro de la  $\pm 1$  desviación estándar, 13 % en la  $\pm 2$  desviaciones estándar y los pozos IGC-1040, IGC-1847 y L-132 se localizaron fuera de  $\pm 2$  desviaciones estándar, por ende, estos tres pozos no fueron considerados en las proyecciones.

Por medio del análisis de sensibilidad se sabe que el modelo se muestra altamente sensible a tres componentes principales: conductividad hidráulica, rendimiento especi-

fico y recarga, el resto de los valores, tales como las conductancias del río y canal, no presentaron variaciones significativas.

Con base a los resultados obtenidos se recomienda tomar en cuenta, en estudios posteriores, las siguientes recomendaciones, esto con el fin de ayudar en la gestión hídrica y mejorar el modelo matemático planteado en esta investigación:

1.- Realizar una mayor cantidad de pruebas de bombeo en todo el Valle para mejorar la precisión y definir de manera más detallada las propiedades hidráulicas del acuífero, esto en función de que no se tiene información actualizada de las pruebas de bombeo.

2.- Actualizar los censos de aprovechamiento, ya que los registros que se tienen corresponden al año 2017 y estos se modifican constantemente en función de las necesidades de la población.

3.-Hacer estudios geofísicos, por ejemplo, prospección geoelectrica para identificar las unidades y asociar su respuesta resistiva a la composición de materiales que se encuentren en el subsuelo, esto para determinar, con mayor exactitud y detalle las unidades que constituye el acuífero.

4.- Las estaciones hidrométricas y climatológicas son esenciales en la construcción del balance hídrico, por ello, es necesario instalar una red actualizada, que contenga y ponga a disposición publica los datos más recientes.

5.- Analizar el impacto que tiene la recarga vertical ascendente de aguas geotermales en zonas de falla geológica.

6.- Evaluar el efecto producto de las sequías prolongadas en el acuífero.



# Bibliografía

- [1] David Keith Todd & Larry W. Mays, *Groundwater Hydrology*, Wiley, 2005.
- [2] Burchi, S. & Mechlem, K. (2005). *Groundwater in international law: Compilation of treaties and other legal instruments*, (No. 86). Food y Agriculture Org.
- [3] Huizar-Álvarez, R., Mitre-Salazar, L. M., Marín-Córdova, S., Trujillo-Candelaria, J., & Martínez-Reyes, J. (2011). Subsidence in Celaya, Guanajuato, Central Mexico: implications for groundwater extraction and the neotectonic regime. *Geofísica internacional*, 50(3), 255-270.
- [4] Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Guanajuato. (1997), *Sistema de Información de los Organismos Operadores de Agua*, (No. 7). Aqua forum.
- [5] Comisión Nacional del Agua. (2008), *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Celaya (1115), Estado de Guanajuato*. Gerencia de evaluación y ordenamiento de acuíferos. Diario oficial de la Federación.
- [6] López Alvis, Jorge (2017). *Modelo numérico del flujo de agua subterránea para la cuenca de Celaya*, (tesis de Maestría). UNAM, México.
- [7] Romero, J. H., Palacios, O. L., & Escobar, B. S. (2017). *Estimación de la sobreexplotación producida en el acuífero Valle de Celaya (México)*. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(4), 127-138.

- [8] Amézaga Campos Blanca Sofía (2016). *Actualización Hidrogeológica del Acuífero Valle de Celaya. Análisis y determinación por concentraciones de Arsénico*, (tesis de Maestría). UNAM, México.
- [9] Lesser y Asociados, S.A. de C.V (2002). *Sinopsis: Seguimiento del estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Valle de Celaya , Gto.*. Comisión Estatal del Agua en Guanajuato.
- [10] Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (1998). *Estudio Hidrológico del Estado de Guanajuato*, ISBN 970-13-1916-8, 28-32.
- [11] Carranco Lozada Simón Eduardo (2012). *Efectos de cambio de uso de suelo sobre un acuífero en una región tectónica activa*, (tesis de Maestría). IPICYT, México.
- [12] Carranco Lozada Simón Eduardo (2019). *Desarrollo de una metodología para la estimación de la componente horizontal en la deformación del terreno: Caso Ciudad de Celaya*, (tesis de Doctorado). IPICYT, México.
- [13] Ortíz, E. (2008). *Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía*,(INEGI, México).
- [14] CONABIO, P. D. G. (2004). *Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad*.
- [15] Arnfield, A. John (2020, November 11). Köppen climate classification. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/Koppen-climate-classification>.
- [16] (2020) Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN a través de su plataforma web del CICESE: <http://clicom-mex.cicese.mx>
- [17] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2004). Guía para la interpretación de cartografía. Edafología.

- [18] Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M., & Ferrari, L. (2005). *Petrogénesis ígnea de la faja volcánica transmexicana*. Boletín de la Sociedad geológica Mexicana, 57(3), 227-283.
- [19] Avila-Olivera, J. A., & Garduño-Monroy, V. H. (2008). A GPR study of subsidence-creep-fault processes in Morelia, Michoacán, Mexico. *Engineering Geology*, 100(1-2), 69-81.
- [20] Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., Reyes-Zaragoza, M.A., Orozco-Esquivel, M.T., Ojeda-García, A. C., Vassallo, L. F.. (2001), *Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 18, núm. 2, p. 129-148.
- [21] Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., M.A., Orozco-Esquivel, M. T., Vassallo, L. F., Shunshan Xu. (2002), *El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende: Implicación en la deformación post-eocénica del centro de México*. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LV, Tomo núm. 1, p. 12-29.
- [22] Nieto-Samaniego, A.F., Macías-Romo, C., Alaniz-Alvarez, S.A. (1996), *Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de la parte meridional de la Mesa Central, México*, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13, 117-122.
- [23] Huizar-Álvarez, R., Mitre-Salazar, L., Marín-Córdova, S., Trujillo-Candelaria, J., Martínez- Reyes, J. (2011), *Subsidence in Celaya, Guanajuato, Central Mexico: implications for groundwater extraction and the neotectonic regime*. *Geofísica Internacional*, 50-3, 255-270.
- [24] Pasquaré, G., Vezzoli, L. & Zanchi, A. (1987). *Morphological and structural model of Mexican Volcanic Belt*. *Geofísica Internacional*, 26(2).
- [25] Demant, A. (1978). *Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación*. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 2(2), 172-187.

- [26] López-Alvis, J., Carrera-Hernández, J. J., Levresse, G., & Nieto-Samaniego, Á. F. (2019). *Assessment of groundwater depletion caused by excessive extraction through groundwater flow modeling: the Celaya aquifer in central Mexico*. *Environmental Earth Sciences*, 78(15), 482.
- [27] Comisión Estatal del Agua en Guanajuato (2017). *Compendio del agua subterránea en Guanajuato*, (CEAG, México).
- [28] Daniel F. Campos–Aranda (2009). *N Number identification through the TUH method, in fifteen rural watersheds of two geographical zones in Mexico*, *Agrociencia*, 43(8), 763-775.
- [29] H. F. Wang & M. P. Anderson, *Introduction to Groundwater Modeling*, Academic Press. 1995.
- [30] Konikow, L. F., Goode, D. J., & Hornberger, G. Z. (1996). *A three-dimensional method-of-characteristics solute-transport model (MOC3D)*, (Vol. 96, No. 4267). US Department of the Interior, US Geological Survey.
- [31] Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*, (No. 629.1 F7).
- [32] Jochen Bundschuh, Mario César Suárez A., *Introduction to the Numerical Modeling of Groundwater and Geothermal Systems*, CRC Press, 2010.
- [33] V. Vázquez-Báez, A. Rubio-Arellano, D. García-Toral, I. Rodríguez Mora, *Modeling an Aquifer: Numerical Solution to the Groundwater Flow Equation*, *Mathematical Problems in Engineering* Vol. 2019, ID 1613726, <https://doi.org/10.1155/2019/1613726>, 2019.
- [34] McDonald, M. G., & Harbaugh, A. W. (1988). *Techniques of water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*, Chapter A1. McDonald y Harbaugh.
- [35] Scanlon, B. R., Mace, R. E., Smith, B., Hovorka, S., Dutton, A. R., & Reedy, R. (2001). *Groundwater availability of the Barton Springs segment of the Edwards Aquifer. Texas: Numerical simulations through*, 2050.

- [36] Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (1992). Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport. Academic Press Inc., San Diego, CA. *Journal of Hydrology*, 140, 393-395.
- [37] ASTM, 1995, Standard Guide for Subsurface Flow and Transport Modeling, ASTM Publication D5880-95, 5 pp
- [38] G. de Marsily, F. Delay, V. Teles and M. Schafmeister, Some current methods to represent the heterogeneity of natural media in hydrogeology, *Hydrogeology Journal*, Vol. 6, No. 1, pp. 115-130, 1998.
- [39] J. Bear and A. H. D. Cheng. Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport. Springer. 2010.
- [40] A. Atangana and B.S.T. Alkahtani, New model of groundwater flowing within a confine aquifer: application of Caputo-Fabrizio derivative, *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 9, No. 8, 2016.
- [41] C. Grossmann, H-J. Roos and M. Stynes, Numerical Treatment of Partial Differential Equations, 1st ed. Berlin: Springer, 2007.
- [42] D. K. Todd and L. W. Mays, *Groundwater Hydrology*, 3rd ed. Wiley, 2004.
- [43] F. Jazaei, M.J. Simpson, T.P. Clement, Spatial analysis of aquifer response times for radial flow processes: Nondimensional analysis and laboratory-scale tests, *Journal of Hydrology*, vol. 532, pp. 1-8, DOI:10.1016/j.jhydrol.2015.11.024, 2016.
- [44] Joerg Werner, *Introducción a la Hidrogeología*, Universidad Autónoma de Nuevo León, Primera Edición, pp. 158-164, 1996.
- [45] Sadiq, R., Kleiner, Y., & Rajani, B. (2007). Water quality failures in distribution networks—risk analysis using fuzzy logic and evidential reasoning. *Risk Analysis: An International Journal*, 27(5), 1381-1394.
- [46] Anderson, M. P., & Woessner, W. W. (1992). The role of the postaudit in model validation. *Advances in Water Resources*, 15(3), 167-173.

- [47] J. Barthélemy, T. Carletti, L. Collier, V. Hallet, M. Moriamé and A. Sartenaer, Interaction prediction between groundwater and quarry extension using discrete choice models and artificial neural networks, *Environmental Earth Sciences*, 75:1467, 2016.
- [48] S.K. Hansen, S. Pandey, S. Karra and V.V. Vesselinov, CHROTRAN: A mathematical and computational model for in situ heavy metal remediation in heterogeneous aquifers, Los Alamos National Laboratory, Report Number: LA-UR-16-29041, arXiv:1703.01381v1, 2017.
- [49] J. Tóth, A Theory of groundwater motion in small drainage basins in central Alberta, Canada, *Journal of Geophysical Research*, vol. 67, no. 11, pp. 4375-4388, 1962.
- [50] J. Tóth, A theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins, *Journal of Geophysical Research*, vol. 68, no. 16, pp. 4795-4812, 1963.
- [51] M.J. Simpson, Calculating Groundwater Response Times for Flow in Heterogeneous Porous Media, *Groundwater*, DOI:10.1111/gwat.12587, 2017.
- [52] Comisión Estatal del Agua y Saneamiento de Guanajuato (Mayo-Junio 1997). *Sistema de Información de los Organismos Operadores de Agua*. Aqua Forum, Vol. 07, pag.10-11.
- [53] B. Escobar Villagran, *Análisis de la sobre-explotación del acuífero de Texcoco*, Tesis de Doctorado, Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo, Postgrado en Hidrociencias, 2010.
- [54] Andrew Fowler, *Mathematical Geoscience*, Springer, 2011.