



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**Evaluación del funcionamiento de los sistemas de flujo de agua
subterránea mediante un modelo numérico en el acuífero de Calera
Zacatecas**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestría en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Ing. Leonardo Daniel Amaya Varela

Asesor:

Dr. Hermann Rocha Escalante

Co-Asesor:

Dr. Carlos Alfonso Muñoz Robles

San Luis Potosí, S. L. P.

Septiembre de 2023





Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**Evaluación del funcionamiento de los sistemas de flujo de agua
subterránea mediante un modelo numérico en el acuífero de Calera
Zacatecas**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestría en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Ing. Leonardo Daniel Amaya Varela

Asesor:

Dr. Hermann Rocha Escalante

Co-Asesor:

Dr. Carlos Alfonso Muñoz Robles

Comité tutorial

Dr. Antonio Cardona Benavides

Dr. Julián González Trinidad



San Luis Potosí, S. L. P.

Septiembre de 2023



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA

18 de mayo de 2023

**ING. LEONARDO DANIEL AMAYA VARELA
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Hermann Rocha Escalante y Carlos Alfonso Muñoz Robles, Asesor y Coasesor de la Tesis** que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 18 de mayo del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Evaluación del funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea mediante un modelo numérico en el acuífero de Calera, Zacatecas"

Introducción.

1. Antecedentes del acuífero de Calera, Zacatecas
 2. Modelo conceptual del acuífero de Calera, Zacatecas
 3. Implementación del modelo numérico de flujo de agua subterránea
 4. Resultados y análisis de la evaluación de escenarios futuros de los sistemas de flujo de agua subterránea
 5. Propuesta de estrategias de gestión sostenible en el acuífero de Calera
- Conclusiones.
Referencias.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E

DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR.



Copia. Archivo.
*etn.



ANIVERSARIO DE LA
AUTONOMÍA
UASLP 2023

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al 39
fax (444) 826 2336

"UASLP, más de un siglo educando con autonomía"

Evaluación del funcionamiento de los sistemas de flujo
de agua subterránea mediante un modelo numérico en el
acuífero de Calera, Zacatecas

Ing. Leonardo Daniel Amaya Varela

22 de septiembre 2023

Dedicatoria

A mi madre y padre por ser las columnas que sostienen a esta familia
A Tania por ser el apoyo incondicional durante todo este tiempo...

Agradecimientos

A L.: G.: D.: G.: A.: D.: U.:

A mi familia, en especial a mi madre y hermana quienes siempre me han apoyado en mis proyectos estando cuando las necesito. Gracias por cuidar de *potter* y *frida*, sin su ayuda esta empresa no habría sido posible. Las amo.

Al Dr. Hermann Rocha Escalante por haberme dado la oportunidad de trabajar bajo su dirección y por ser una persona paciente conmigo en los momentos de trabajo. Gracias por contribuir en mi formación.

Al Dr. Antonio Cardona Benavides por brindarme la oportunidad de ser partícipe de sus proyectos de investigación durante estos años. Gracias por la experiencia derramada.

A los doctores Carlos Alfonso Muñoz Robles y Julián González Trinidad. Sus aportaciones enriquecieron de la mejor manera este trabajo.

A Mariana. Gracias por el cariño que me brindaste, el apoyo en las horas de trabajo y el cariño en las horas de despeje y por aceptar estar a mi lado durante todo este periodo.

A Joel y Cynthia. Amigos gracias por el apoyo brindado dándome consejos y apoyando en la realización de esta investigación. Gracias por hacerme parte de su familia en San Luis Potosí.

A mis compañeros de cubículo, en especial al M. en I. Sócrates Alonso Torres. Quienes me hicieron parte del equipo de trabajo del Dr. Antonio Cardona.

A mis compañeros de maestría *Diana, Ximena, Rafa, Jorge, Mayra, Juan, Raúl, Sergio, Álvaro* Gracias por las experiencias y el buen recibimiento.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el financiamiento otorgado durante el periodo de trabajo dentro de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y por el financiamiento otorgado en el proyecto **FORDECyT - PRONACES (377899) "Fuentes geogénicas y mecanismos de movilización de arsénico, fluoruro y uranio a sistemas de flujo de agua subterránea en la Sierra Madre Occidental** llevando el No. de becario CONACyT **1144059**.

Resumen

La modelación numérica de agua subterránea es una herramienta de gestión del agua que toma gran importancia en zonas con climas áridos y semiáridos; tal es el caso del acuífero de Calera en Zacatecas, que presenta problemas de extracción intensiva que ha ido en aumento año con año. El objetivo principal de esta investigación es la evaluación del flujo de agua subterránea del acuífero mencionado mediante la implementación de un modelo numérico, con el fin de conocer el comportamiento actual y futuro del flujo de agua subterránea ante diversos escenarios con esquemas de aprovechamiento y de tendencias climáticas, para así proponer estrategias de gestión con perspectivas de sostenibilidad. Para ello se hizo uso de diversas metodologías, inicialmente se ejecutó tratamientos de datos precipitación y temperatura anual para generar un balance hídrico tomando en consideración estaciones climáticas aledañas con series de tiempo de 1980-2018. Posterior a ello se analizaron las tendencias en precipitación y temperatura mediante técnicas estadísticas para conocer la variabilidad climática en el lugar y establecer la influencia en la recarga del acuífero. La implementación del modelo conceptual del acuífero se efectuó en Visual Modflow en su versión 2009.1 utilizando ocho secciones geológicas discretizando el espacio en 181 440 celdas de 500x500 metros repartidas en nueve capas y discretizando el tiempo en 10065 días (1994-2022). La calibración se hizo en estado transitorio utilizando siete fechas históricas de medición del nivel estático obteniendo un NRMS promedio de 9.64 % es decir un valor de confiabilidad del 90.35 %. El análisis de sensibilidad generó que el modelo numérico fue más sensible a los valores del rendimiento específico, seguido por la conductividad hidráulica y finalmente por el almacenamiento específico. Como finalidad se implementaron escenarios proyectados al 2048 los cuales contemplaron las tendencias anuales de extracción mediante bombeo, los efectos de la variabilidad climática en la precipitación y recarga y los impactos del uso de soluciones basadas en la naturaleza (SBN) en zonas de recarga estratégicas utilizando los resultados de un modelo de agua superficial implementado en SWAT. Los resultados sugieren mayores abatimientos si continúa el esquema de apertura de concesiones actual, es decir aumentando la extracción anual en 1.231 hm^3 , así como un incremento en la precipitación en la zona de recarga principal debido a la tendencia de aumento de la precipitación lo que se traduce en mayor reposición de agua vertical; también se estableció un efecto positivo en la utilización de SBN creando una recarga acumulada mayor para el año 2048 que si no se hubiesen llevado a cabo estas mejoras en la recarga. La implementación de estas estrategias más una asignación de concesiones más mesurada y protección de las zonas de recarga para evitar alteraciones en los procesos de recarga vertical y calidad de agua, ayudará a tener una gestión más sostenible.

Abreviaturas y Siglas

Acuífero de Calera	Aq Cal
Agua Subterránea	AS
Comisión Nacional del Agua	CONAGUA
Formación geológica	fm
Instituto Nacional de Estadística y Geografía	INEGI
Método de Diferencias Finitas	MDF
Método de Elemento Finito	MEF
Modelos numéricos de agua subterránea	MNAS
Universidad Autónoma de San Luis Potosí	UASLP
Universidad Autónoma de Zacatecas	UAZ
Registro Público de Derechos del Agua	REPDA
San Luis Potosí	SLP
Variabilidad Climática	VC
<i>Visual Modflow</i>	VMF
Zacatecas	Zac

Índice general

Resumen	IV
Abreviaturas y Siglas	V
Introducción.	1
1. Antecedentes del acuífero de Calera, Zacatecas	3
1.1. Rasgos relevantes del agua subterránea en el mundo	3
1.2. Aspectos del agua subterránea en México	5
1.3. Estudios previos del agua subterránea en el acuífero de Calera	6
1.4. Problemática	10
1.5. Justificación	11
1.6. Objetivos	12
1.7. Metodología de Trabajo	12
2. Modelo conceptual del acuífero de Calera, Zacatecas	14
2.1. Caracterización de la región del acuífero de Calera, Zacatecas	14
2.1.1. Ubicación	14
2.1.2. Hidrología superficial	17
2.1.3. Clima	18
2.1.4. Geología	19
2.1.4.1. Estratigrafía	21
2.1.5. Tipo de suelo y uso de suelo	25
2.1.6. Calidad del agua	28
2.1.7. Aspectos relevantes del uso del agua en el acuífero	32
2.2. Balances hidrológicos anuales	35
2.2.1. Tratamiento previo de datos climáticos	35
2.2.1.1. Estaciones climáticas	35
2.2.1.2. Análisis de homogeneidad e independencia	36
2.2.1.3. Datos faltantes	38
2.2.2. Temperatura media anual	39
2.2.2.1. Método de isoyetas	40
2.2.3. Precipitación	42
2.2.4. Evapotranspiración	43
2.2.4.1. Método de Turc	43
2.2.4.2. Método de Coutagne	44
2.2.5. Escurrimiento	45

2.2.6.	Infiltración	46
2.2.7.	Direcciones de flujo de agua subterránea	48
2.2.8.	Entradas horizontales de flujo de agua subterránea	48
2.2.9.	Extracción de agua mediante pozos de bombeo	50
2.2.10.	Recarga vertical natural e inducida de agua en el acuífero	51
2.2.11.	Balance General del agua en el acuífero de Calera, Zacatecas	55
2.3.	Modelo SWAT como alternativa en el balance de agua superficial	57
2.3.1.	Descripción del modelo basado en SWAT	58
2.3.2.	Balance hídrico anual	59
2.4.	Evaluación de la Variabilidad Climática	62
2.4.1.	Pruebas estadísticas en series de tiempo climáticas	64
2.4.1.1.	Prueba de Mann-Kendall	64
2.4.1.2.	Magnitud de cambio de la tendencia (Prueba de pendiente de Sen)	65
2.4.2.	Discusión del modelo conceptual	67
2.5.	Modelo Conceptual general del acuífero de Calera	69
3.	Implementación del modelo numérico de flujo de agua subterránea	70
3.1.	Introducción	70
3.2.	Diseño del modelo	71
3.2.1.	Ecuación general de gobierno de agua subterránea	71
3.2.2.	Solución numérica de la ecuación de gobierno de flujo de agua subterránea	72
3.2.2.1.	Método de diferencias finitas	72
3.3.	Implementación del modelo	74
3.3.1.	Geometría del modelo	75
3.3.2.	Discretización espacial	77
3.3.3.	Discretización temporal	79
3.3.4.	Propiedades hidráulicas del medio geológico	80
3.3.5.	Piezometría histórica	90
3.3.6.	Pozos de bombeo	91
3.3.7.	Cargas iniciales	93
3.3.8.	Recarga	94
3.4.	Calibración y validación del modelo numérico	96
3.4.1.	Calibración del modelo (Estado Transitorio)	96
3.4.2.	Validación y análisis de sensibilidad	105
3.4.3.	Resumen y discusión de la implementación del modelo numérico de flujo	107
4.	Resultados y análisis de la evaluación de escenarios futuros de los sistemas de flujo de agua subterránea	110
4.1.	Introducción	110
4.2.	Escenario uno: Proyección de tendencias actuales de extracción de agua subterránea	110
4.2.1.	Descripción del Escenario	110
4.2.2.	Implementación en el modelo numérico	112
4.3.	Escenario dos: Incidencia de la Variabilidad Climática en la recarga del acuífero	113

4.3.1.	Descripción del escenario	113
4.3.2.	Implementación en el modelo numérico	114
4.4.	Escenario tres: Estrategias basadas en la naturaleza en la mejora de la recarga de agua en el acuífero	115
4.4.1.	Descripción del Escenario tres	115
4.4.2.	Implementación en el modelo numérico	117
4.5.	Resultados de las simulaciones	118
4.5.1.	Escenario uno	119
4.5.2.	Escenario dos	121
4.5.3.	Escenario tres	123
4.5.4.	Resumen y discusión de los resultados de la evaluación de escenarios futuros	124
5.	Propuesta de estrategias de gestión sostenible en el acuífero de Calera	129
5.1.	Introducción	129
5.2.	Estrategias generales para una mejor gestión del agua subterránea en el acuífero	130
5.3.	Propuestas basadas en los resultados de los escenarios implementados	131
	Conclusiones.	134
	Referencias	137

Índice de figuras

1.1. Disponibilidad de agua en acuíferos administrativos. Elaboración propia con datos de la CONAGUA, 2020.	6
2.1. Localización de la zona de estudio. Elaborada con datos del INEGI 2020.	15
2.2. Subcuencas hidrográficas dentro de la zona de estudio. Elaboración con datos del INEGI 2010.	18
2.3. Climograma de la Estación climática Calera (32003). Elaboración con datos de la CONAGUA (1957-2018).	19
2.4. Evolución tectónica de la región (Modelo 1) tomado de Centeno-García y Silva-Romo, 1997.	20
2.5. Geología superficial del acuífero de Calera. Elaborada con datos del Servicio Geológico Mexicano (1997-2011), Krienen L. (2018), INEGI (2011).	24
2.6. Edafología (tipos de suelos) en la zona de estudio. Elaborada con datos del INEGI (2007).	27
2.7. Vegetación y uso de suelo sobre el acuífero de Calera. Elaborada con datos del INEGI (2010).	28
2.8. Diagrama de Piper de muestras de agua subterránea del acuífero de Calera. Elaborada con datos de Ariel Consultores (2004).	30
2.9. Concentraciones de Arsénico en $\mu\text{g/L}$ en la zona de estudio. Elaborada con datos obtenidos de Ariel Consultores (2004).	33
2.10. Concentraciones de Flúor en mg/L en la zona de estudio. Elaborada con datos obtenidos de Ariel Consultores (2004).	34
2.11. Evolución del volumen concesionado en el acuífero. Elaborada con datos de la CONAGUA (1994-2021).	35
2.12. Porcentaje de volumen de agua concesionada según su uso. Elaborada con datos del REPDA (1994-2021).	36
2.13. Estaciones climáticas utilizadas en el análisis de precipitación y temperatura. Elaborada con datos del INEGI (1980-2018).	41
2.14. Gráfico comparativo entre la precipitación, la ETR (Turc) y la ETR (Coutagne) para los años establecidos. Elaboración propia con datos de la CONAGUA 1980-2018.	45
2.15. Direcciones de flujo y líneas piezométricas del año 2015.	49
2.16. Celdas de entrada de flujo horizontal al acuífero mediante la ley de Darcy. Elaborada con datos de la CONAGUA 2015.	51
2.17. Pozos de extracción de agua en sus diversos usos. Elaboración propia con datos de la CONAGUA 1994-2021.	52
2.18. Zonificación de la recarga sobre el acuífero.	56

2.19. Resultados de la simulación anual del modelo SWAT de la cuenca superficial del acuífero de Calera.	61
2.20. Distribución espacial de los valores (mm) de: A) precipitación media anual; B) ETR media anual; C) Escurrimiento medio anual y D) Percolación media anual de los resultados de la modelación SWAT.	63
2.21. Balance de agua en el acuífero de Calera para el año 2017 (valores en millones de metros cúbicos). Elaboración propia.	69
3.1. Ejemplo de espacio discretizado en nueve celdas con condiciones de iniciales. . . .	72
3.2. Secciones geológicas No. 1 y 2. Elaborados por Rivera-Armendáriz (2019).	76
3.3. Secciones geológicas 3 - 8. Elaborados por Rivera-Armendáriz (2019).	76
3.4. Puntos de muestreo geofísico mediante el método transiente electromagnético. Elaboración propia con datos de SGM, Rivera y Cauich (2019) y Krienen (2018). . . .	77
3.5. Planta de la discretización espacial. Elaborada mediante VMF.	78
3.6. Corte transversal mostrando las columnas. Elaborada mediante VMF.	79
3.7. Identificación de las diferentes capas generadas por cada una de las superficies. . .	79
3.8. Nombramiento de cada una de las superficies y las capas generadas (<i>Slices</i>). . . .	79
3.9. Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la zona de estudio (Terreno Superficial).	81
3.10. Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la zona de estudio (Bottom S1).	82
3.11. Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la zona de estudio (Top S3). .	83
3.12. Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la zona de estudio (Bottom S3).	84
3.13. Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la zona de estudio (Top S5). .	85
3.14. Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la zona de estudio (Bottom S5).	86
3.15. Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la zona de estudio (Top S7). .	87
3.16. Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la zona de estudio (Bottom S7).	88
3.17. Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la zona de estudio (Basamento). .	89
3.18. Distribución espacial de los pozos de observación (piezómetros) de la red de monitoreo de Calera.	92
3.19. Cargas iniciales que corresponden a la elevación del nivel estático (ENE) del año 1994. .	93
3.20. Distribución espacial de la recarga en la primera capa del modelo numérico implementado.	95
3.21. Calibración en estado transitorio para el día de medición 1096.	98
3.22. Calibración en estado transitorio para el día de medición 4534.	99
3.23. Calibración en estado transitorio para el día de medición 5387.	100
3.24. Calibración en estado transitorio para el día de medición 5967.	101
3.25. Calibración en estado transitorio para el día de medición 6726.	102
3.26. Calibración en estado transitorio para el día de medición 7398.	103
3.27. Calibración en estado transitorio para el día de medición 8432.	104
3.28. Validación del modelo mediante mediciones del nivel estático realizadas a mediados del año 2022.	106

3.29. Resultados del análisis de sensibilidad del modelo para diferentes parámetros considerados.	107
4.1. Punto de ruptura y pendientes en la serie de tiempo de extracciones contra el año de concesión.	111
4.2. Ubicación de nuevos pozos de extracción propuestos en el escenario 1.	113
4.3. Isoyetas de la distribución espacial de la proyección de la tendencia en la precipitación y temperatura media anual (proyección media 2023-2048).	115
4.4. Subcuencas generadas mediante SWAT y subcuencas priorizadas para implementación de manejo de recarga de acuíferos.	118
4.5. Curvas de abatimiento anual del nivel estático para el escenario uno.	120
4.6. Curvas de abatimiento anual del nivel estático para el escenario dos.	122
4.7. Curvas de abatimiento anual del nivel estático para el escenario tres.	125
4.8. Comparación de valores de extracción calculados y pronosticados en el periodo de tiempo de simulación.	126
4.9. Comparación de valores de recarga calculados y pronosticados en el periodo de tiempo de simulación.	127
4.10. Comparación de los porcentajes de error para los tres diferentes escenarios con interés en la extracción.	128
5.1. Ubicación espacial de las propuestas de gestión sostenible basadas en los resultados de los escenarios futuros evaluados.	133

Índice de cuadros

2.1. Coordenadas del polígono que delimita al acuífero administrativo. Elaborada con datos de CONAGUA 2020.	16
2.2. Estaciones climatológicas inicialmente contempladas. Elaborada con datos de la CONAGUA.	37
2.3. Ejemplo de valores de precipitación total estimados en la estación Calera 32003. Elaborada con datos de la CONAGUA (1980-2018).	40
2.4. Valores de temperatura media anual (TMA) en °C obtenidos por el método de isoyetas.	42
2.5. Valores de precipitación media anual (PMA) en mm obtenidos por el método de isoyetas.	43
2.6. Valores de evapotranspiración real (ETR) en mm obtenidos por el método de Coutagne.	45
2.7. Valores de escurrimiento en mm para los años 1980-2018.	47
2.8. Valores de infiltración en mm para los años 1980-2018.	47
2.9. Cálculo de entradas horizontales de agua subterránea aplicando la ley de Darcy para el año 2015.	50
2.10. Valores de volumen (Vol) y volumen acumulado (VA) de agua concesionada para cada año. Elaboración propia con dato del REPD.	53
2.11. Recarga inducida por uso público - urbano de agua en el periodo 1994-2022.	54
2.12. Balance de agua superficial con valores en millones de metros cúbicos.	57
2.13. Balance de agua subterránea con valores en hm^3	57
2.14. Comparación de resultados de balance anual y balance simulado mediante SWAT (valores en mm/año).	62
2.15. Comparación de resultados de balance anual y balance simulado mediante SWAT (valores en mm/año) con infiltración modificada.	62
2.16. Resultados de las Tendencias en la precipitación aplicando el método de Mann-Kendall con datos de 1980-2018	66
2.17. Magnitud de cambio en las tendencias de precipitación con datos de 1980-2018	66
2.18. Magnitud de cambio en las tendencias de temperatura media con datos de 1980-2018	67
2.19. Resultados de las tendencias en PMA y TMA y magnitudes de cambio para las distintas estaciones (en mm en precipitación y °C en temperatura)	67
3.1. Unidades geoelectricas e hidroestatigraficas. Elaboradas por Krienen (2018), Rivera-Armendáriz y Cauhic-Kau (2019).	75
3.2. Propiedades hidráulicas del medio geológico. Elaborada con datos de Ariel Consultores (2004) y Krienen L. (2018).	80
3.3. Relación de profundidades del nivel estático medidos en piezómetros de la red de monitoreo de Calera (Parte 1).	90

3.4.	Relación de profundidades del nivel estático medidos en piezómetros de la red de monitoreo de Calera (Parte 2).	91
3.5.	Valores de recarga vertical (inducida y natural) sobre la superficie del acuífero. . .	94
3.6.	Propiedades hidráulicas del medio geológico calibradas.	105
3.7.	Comparación entre valores dados en el balance del modelo conceptual y lo simulado por VMF para valores de extracción y recarga.	105
3.8.	Tabla comparativa de los cuatro modelos discutidos	109
4.1.	Valores de la recarga en cada una de las subcuencas generadas mediante SWAT ($R =$ $Recarga$, $SC = Subcuenca$).	117
4.2.	Resultados de la simulación del escenario uno. (Valores hm^3).	119
4.3.	Resultados de la simulación del escenario dos. (Valores hm^3).	121
4.4.	Resultados de la simulación del escenario tres sin mejoras aplicadas. (Valores hm^3). .	123
4.5.	Resultados de la simulación del escenario tres con mejoras aplicadas. (Valores hm^3). .	124

Introducción.

La gestión sustentable del agua se ha vuelto un problema crítico debido al incremento de la demanda por parte de diferentes actores como la agricultura, la industria y el uso público-urbano (Singh, 2014). Sobre todo, la gestión del agua subterránea (AS) ha tomado relativa relevancia en las últimas décadas debido a que es una de las principales fuentes de abastecimiento para uso y consumo humano. El AS representa el 1.69 % del agua mundial y es el 30 % del agua dulce disponible (Gleick, 1993) por lo cual, debería ser una de las principales fuentes de abastecimiento de la sociedad, sin embargo, existe una marcada dependencia al agua superficial en países como México donde sólo el 40.3 % del agua utilizada en las diversas actividades, es agua subterránea (Conagua, 2022).

La administración correcta del agua debe ser un ente que englobe de forma eficaz los procesos que intervienen en el ciclo hidrológico, debido a que los recursos hídricos son parte fundamental en los sistemas socioeconómico-ambientales (Phan, Bertone, y Stewart, 2021). Entender los mecanismos que regulan los procesos del ciclo hídrico nos llevará a la gestión necesaria que afronte los problemas del siglo XXI (Cambio Climático, sobrepoblación, contaminación, vulnerabilidad de ecosistemas y eventos climáticos extremos). La gestión correcta del AS en estos sistemas trilaterales (sociedad, economía, ambiente) toman relevancia en regiones áridas y semi áridas del planeta (Alfarrah y Walraevens, 2018) donde los problemas enunciados son más evidentes debido a la baja disponibilidad del agua de lluvia.

Desde que se empezó a formular la teoría de Sistemas gravitacionales de flujo de agua subterránea por Jozsef Tóth (1962-2009) y R. Allan Freeze y John A. Cherry en la década de los años sesenta, la conceptualización del AS cambió de forma radical y así mismo su administración en gran parte del mundo. Esta teoría llamada sistemas de flujo de agua subterránea comprende todo el ciclo hídrico y su relación con el ambiente donde ocurren, toma en consideración la topografía del lugar, la vegetación y uso de suelo, la calidad del agua, geología, clima y medio ambiente (Tóth, 2009). Estos nuevos estudios permitieron desarrollar y comprender el mecanismo que genera la movilización del agua mediante una expresión matemática basada en los experimentos de Henry Darcy (1803-1858). Esta ecuación relaciona las propiedades hidráulicas de las rocas, la energía potencial de la carga piezométrica, la capacidad de almacenamiento del medio y el tiempo (Freeze y Cherry, 1977).

El progreso de esta teoría permitió abrir nuevos campos de estudio como la hidrogeoquímica, remediación de acuíferos contaminados y la modelación de AS. Esta última tomó gran aceptación a partir del mejoramiento de la capacidad de las computadoras para resolver

matrices grandes y complejas (Anderson, Woessner, y Hunt, 2015) (Zhou y Li, 2011) (Hölting y Coldewey, 2019). La modelación numérica de AS permitió conocer el comportamiento de los flujos en distintos materiales, así como su distribución. El uso de métodos numéricos en la resolución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales ayudó a los investigadores a poder resolver la ecuación general de flujo en estados estacionario y transitorio mediante sistemas de cómputo como *Modflow* (1968) y más reciente *FeFlow* (1979). Estos modelos numéricos han sido aplicados ampliamente en distintos países, tales como Estados Unidos, Holanda y China. Es una de las principales formas de gestión del agua en países anglosajones como Canadá, Estados Unidos y Australia por mencionar algunos (Zhou y Li, 2011).

Esta investigación en particular pretende ser la aplicación de programas de cómputo comerciales para la evaluación de los sistemas de flujo de AS en un acuífero ubicado en la parte central del Estado de Zacatecas, México. Este acuífero ha sido, en las últimas par de décadas, sometido a una extracción intensiva por parte de los usuarios, en especial por la agricultura la cual utiliza aproximadamente el 70 % del volumen extraído anualmente (140 Millones de metros cúbicos anuales de agua extraída según datos del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA)). La utilización de un modelo numérico en la gestión de esta agua permitirá a los usuarios y tomadores de decisiones generar e implementar estrategias para hacer un uso más sostenible del agua. Para lograr este objetivo se planteó como base cinco objetivos particulares: primero se generó un modelo conceptual del lugar para conocer cómo se relacionan los flujos con su ambiente; posterior a ello se tratan los datos climáticos para conocer la variabilidad de la precipitación y la temperatura y ubicar tendencias espacio temporales. En tercer lugar se implementó el modelo conceptual en un modelo numérico procesado en *Visual Modflow* 2009.1 el cual resuelve la ecuación general de flujo mediante el método de diferencias finitas aplicando distintos métodos de solución matricial. Posteriormente se calibró y validó el modelo. Esto permitió evaluar escenarios futuros basados en tendencias climáticas y de extracciones. Se propuso finalmente estrategias de gestión sostenible basadas en los resultados de las simulaciones de escenarios futuros.

Capítulo 1

Antecedentes del acuífero de Calera, Zacatecas

1.1. Rasgos relevantes del agua subterránea en el mundo

El agua subterránea (AS) es un componente ordinario del ciclo hidrológico y no es independiente de otros componentes (Margat y Van der Gun, 2013) su papel dentro de este ciclo ha sido importante en el suministro de agua en regiones del planeta donde la precipitación es escasa, además de tener baja susceptibilidad a la contaminación (Price y Back, 2013). A nivel global el AS representa el 30 % del agua *dulce* la cual se deriva del total global que representa aproximadamente el 3 %, el restante 97 % es agua de los océanos. Del agua disponible, el AS es quien tiene el mayor porcentaje (Kresic, 2006), sin embargo, esta no está distribuida de forma equitativa en la corteza terrestre y su explotación en cantidades suficientes para el abastecimiento no es siempre posible (Price y Back, 2013) y una vez contaminada, su tratamiento se vuelve un proceso costoso y poco exitoso.

El uso de AS y su explotación mediante pozos se puede establecer en el año 3000 a. C. en la antigua China (Hölting y Coldewey, 2019) y a pesar del desarrollo temprano de la explotación del AS, el progreso científico en esta área ha sido lento en esta primera etapa. Desde las teorías grecolatinas del origen de estas aguas (Aristóteles, Platón, Homero, etc.), pasando por la teoría renacentista de Kepler (1571-1630) y Bernard Palissy (1510-1589) y el entendimiento del ciclo hidrológico hasta llegar a *Jean-Baptiste de Lamarck* (1744-1829) quien acuñó por primera vez el término **hidrogeología**. En la Francia del Siglo XIX, los trabajos del ingeniero Henry Darcy (1803-1858) propusieron el primer experimento para el entendimiento del flujo del agua a través de un medio poroso dando lugar a lo que se conoce hoy en día como la "Ley de Darcy" (Hölting y Coldewey, 2019). Esta ley establece una relación matemática entre el flujo a través de un medio poroso (en el experimento distintos tipos de arenas y gravas) y las cargas de presión al inicio y final del conducto por donde fluía el fluido (Woessner y Poeter, 2020).

El progreso del estudio teórico del AS se aceleró a partir de la década de los años 1950 con el desarrollo de los sistemas computacionales (Hölting y Coldewey, 2019) lo que dio lu-

gar al modelado del flujo de AS para la investigación del comportamiento de los parámetros hidrogeológico por medio de escenarios - pronósticos.

Un modelo numérico de AS es una representación simplificada del funcionamiento de los sistemas de flujo (Anderson y cols., 2015), estos modelos numéricos se centran en la resolución de la ecuación general de balance. Los modelos numéricos hidrodinámicos comenzaron a tener importancia entrada la década de los años setenta (Iglesias-Lopez, Ortiz-Villalobos, Rodriguez, y Minga, 2021). En 1966, Freeze y Witherspoon utilizaron métodos numéricos para resolver la ecuación de flujo y simular el estado estacionario (ecuación de Laplace). La implementación de este modelo les permitió establecer las líneas de flujo y comprender su distribución en un plano regional (Zhou y Li, 2011).

Uno de los trabajos importantes fue el llevado a cabo por la *U. S. Geological Survey* en el año de 1978 donde el modelo desarrollado por Freeze en 1971, se implementó en el estudio de varios grandes acuíferos en Estados Unidos, contribuyendo con la creación de una base de datos nacional, siguiendo con el entendimiento de la respuesta de los sistemas de flujo, el mejoramiento de los modelos conceptuales y finalmente con la fundación de un atlas hidrogeológico estadounidense (Zhou y Li, 2011). Posterior a este trabajo McDonal y Harbaugh (1984) generaron un modelo tridimensional de flujo de AS para la *U. S. Geological Survey* basado en la solución de ecuaciones diferenciales mediante el método de Diferencias Finitas (MDF)(Iglesias-Lopez y cols., 2021) el cual fue mejorado en 1988 y que dio lugar al desarrollo del código *Modflow*.

El uso de estos códigos para la solución numérica de la ecuación de general flujo para la investigación de los sistemas gravitacionales de AS ha sido abrazado en gran parte del mundo, su implementación es popular en las medidas de gestión de AS y su replanteamiento, en la relación industria-agua como en la minería, la subsidencia y las excavaciones, conocer el comportamiento del agua superficial y subterránea, el diseño de túneles y la filtración de agua de lluvia (Hölting y Coldewey, 2019).

Los modelos numéricos de agua subterránea (MNAS) son herramientas ampliamente utilizadas en el entendimiento del flujo de AS y han tomado parte en la gestión del agua a nivel mundial y en la investigación del comportamiento en sistemas complejos como acuíferos costeros y kársticos. Así mismo, la implementación de MNAS han comenzado a tener importancia en países en desarrollo como México, donde en diversas investigaciones se han evaluado los sistemas de flujo como medida de gestión del agua en diversas zonas del país, principalmente en la región Norte la cual es de alta actividad económica y agrícola con presencia de bajas precipitaciones. En el estado de San Luis Potosí (SLP), por citar algunos ejemplos, el uso de MNAS se han ejecutado para gestionar el AS proponiendo planes de administración de los recursos hídricos. Rocha (2009) hace uso de estas herramientas de simulación en el acuífero de Río Verde usando VMF en su versión 2009.1 generando esquemas de aprovechamiento basados en los resultados de los escenarios planteados (Rocha Escalante, 2009) proponiendo la ampliación de estudios en la zona, la creación de una red de monitoreo e involucrar a los usuarios del agua. En la zona del Altiplano potosino (caracterizada por su baja precipitación y alta evapotranspiración), León (2020) lleva a cabo una valoración del

desempeño de los niveles del agua en el acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo. El objetivo de esta investigación se centró en la creación de un marco hidrogeológico conceptual y posterior implementación en VMF para generar pronósticos a 10 años (León González, 2020).

Así mismo en otras partes del territorio mexicano, como en el Valle de Celaya (aproximadamente 230 km al sur de la capital de SLP) Rubio en 2021 emplea *Modflow 2005* y la interfaz gráfica *Model Muse* como actor de traducción del código (Rubio Arellano, 2021). Rubio propone la implementación de tres escenarios a evaluar, el primero tendencial (manteniendo el ritmo de extracción hasta el año 2030), el segundo de aumento de bombeo (aumento en un 25 % de las extracciones) y finalmente el tercero propone una reducción del 50 % de las extracciones en todos los sectores. Las propuestas de manejo del acuífero son similares a las citadas con anterioridad.

1.2. Aspectos del agua subterránea en México

En la República Mexicana, el órgano encargado de la administración del agua es la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) organismo que nace de la extinción de la Secretaría de Recursos Hidráulicos. La CONAGUA ha creado la red de acuíferos administrativos la cual consta de 653 acuíferos repartidos en todo el país (CONAGUA, 2019). Estos a su vez se catalogan dentro de 13 regiones hidrológicas administrativas. Para su administración se creó el concepto de *sobreexplotación* el cual indica la situación del acuífero con base en la recarga y extracción media anual la cual es evaluada mediante la norma oficial mexicana (NOM) 011-CONAGUA-2000 publicada en el DOF. Los acuíferos en esta situación de extracción intensiva (*sobreexplotación*) pasaron de ser alrededor de 100 en el año 2001 a 115 en el año 2018.

Los usos que tiene esta agua se dividen en consuntivos y no consuntivos, los primeros pueden ser usos agrícolas, público - urbano, industrias que tienen al agua como materia de uso por ejemplo refresqueras, cerveceras, minería. Los usos no consuntivos pueden ser hidroeléctricas y agua destinada a la conservación ecológica (CONAGUA, 2019). Estos volúmenes de agua son concesionados por la CONAGUA, donde el 39.2 % del volumen total concesionado es AS (para 2018 fueron 34.84 hm^3). A nivel nacional, el uso con mayor volumen concesionado es el destinado a la agricultura, seguido del abastecimiento público y la industria (CONAGUA, 2019).

Otro problema en los acuíferos es cuando tienen problemas de salinidad, ya sea por intrusión del agua de mar debido a un descenso en el nivel piezométrico o que por las características del medio geológico por el que transita el agua. Estos acuíferos administrativos con intrusión de agua de mar son los ubicados en las costas de Yucatán, Sonora y Baja California y con fenómenos de salinización por contactos geológicos son comunes en la región del Altiplano (con Estados como Chihuahua, Coahuila, Durango y el norte de Zacatecas) (CONAGUA, 2019).

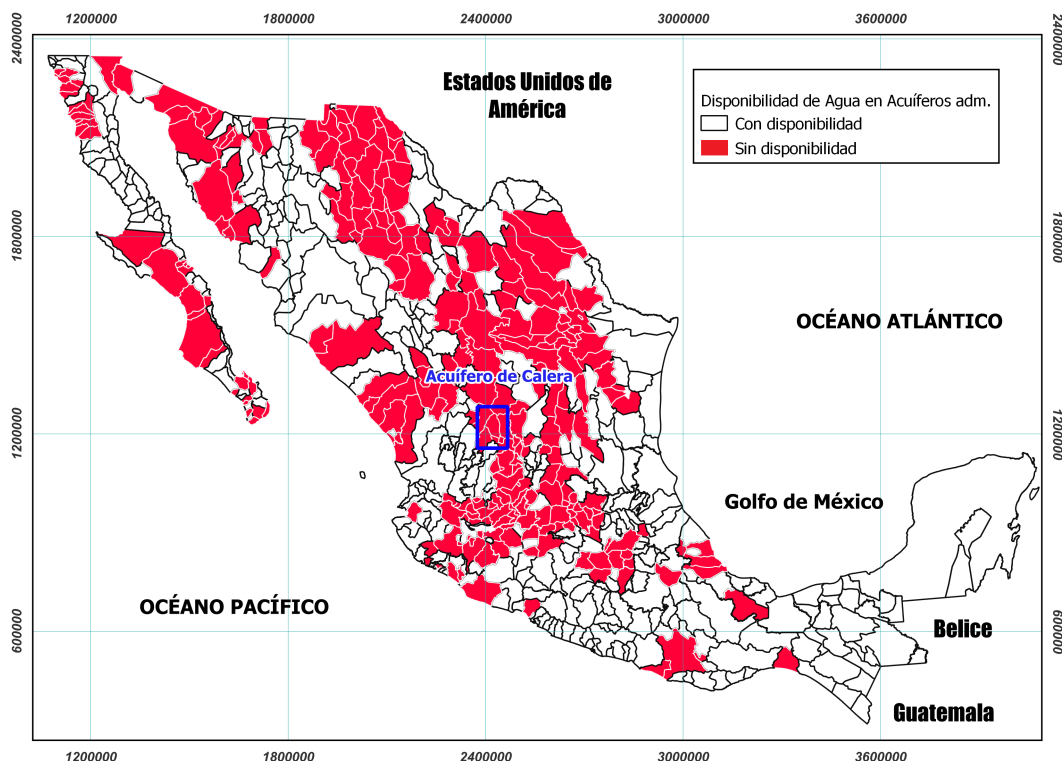


Figura 1.1: Disponibilidad de agua en acuíferos administrativos. Elaboración propia con datos de la CONAGUA, 2020.

1.3. Estudios previos del agua subterránea en el acuífero de Calera

Son múltiples los estudios generados en la zona de la cuenca que da origen al Acuífero de Calera (Aq Cal), estos han tenido diferentes enfoques, encontrándose cuatro principales:

- Estudios hidrogeológicos de caracterización y entendimiento del comportamiento del flujo y localización de fuentes de abastecimiento.
- Estudios hidrogeoquímicos de calidad de agua, composición química, isótopos y evolución de elementos de importancia (principalmente arsénico (As) y flúor (F)).
- Diseño y mejoramiento de redes de monitoreo de AS: para el muestreo de agua, medición de niveles hidráulicos y optimización.
- Manejo integral del AS mediante modelación numérica.

En el estudio de disponibilidad anual (2015) de agua se hace mención de estudios previos hechos a petición de la CONAGUA (CONAGUA, 2015), teniendo que el primer estudio de caracterización se hizo en el año de 1968 el cual lleva por nombre: **Estudio Geohidrológico de la zona de Calera, Zac.** encargado por la antecesora de la CONAGUA, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Este trabajo se centró en las caracterizaciones

geomorfológicas, geológica y geohidrológicas (estratigrafías, piezometría, recarga anual, almacenamiento), se concluye en este trabajo que la recarga se estima en 100 hm^3 con una extracción de 80 hm^3 .

En el año de 1978, la misma secretaría, elabora el **Estudio Hidrogeológico de la Cuenca Calera** en donde se llevaron a cabo pruebas de bombeo, reconocimiento de la geología, un primer estudio de calidad de agua. En ese mismo año tiene lugar el **Estudio de fuentes de abastecimiento en Zacatecas, Zac.** el cual tuvo como finalidad el localizar nuevas fuentes de abastecimiento y proyectar los futuros, actualización de la piezometría, verificación de pozos y geofísica, realizando esto en los acuíferos de Calera, Benito Juárez y Guadalupe - Bañuelos. Estos estudios se actualizan en el año de 1980 bajo el nombre de **Actualización del Estudio Geohidrológico de la Zona Calera**. El siguiente estudio fue el elaborado por la empresa *ingeniería de Evaluación y Prospección* para una nueva localización de fuentes de abastecimiento y comportamiento regional de los acuíferos aledaños al Aq Cal.

El primero modelo numérico mencionado en el estudio de disponibilidad del año 2015 fue elaborado en el año de 1991 bajo el nombre de **Modelo Matemático de simulación del Acuífero de Calera** llevado a cabo por la CONAGUA, generando una actualización en el año de 1997.

Posterior a ello, en el año de 1993 la Subgerencia de administración del agua perteneciente a la Gerencia Estatal de Zacatecas, confecciona el **Informe técnico de la zona de Calera** donde se establecen las características generales del acuífero (clima, hidrología, geología, hidrogeología, hidrogeoquímica) que da como resultado un estudio de balance que concluye en la reglamentación de las extracciones y prevenir su incremento y proyectar un programa de reducción gradual de extracciones pues se declara en situación de extracción intensiva (administrativamente "sobreexplotación")(GEZ, 1993).

En 1996, la CONAGUA subcontrata a la empresa Ariel Consultores S.A. quien realiza el **Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de redes de observación de los acuíferos Calera, San Luis Potosí, Toluca** que tuvo como finalidad establecer la zona de nuevo pozos de observación (ampliando al red a 56 piezómetros) configurar las zonas de recarga y descarga así como la dirección del flujo para ese año y áreas de mayor extracción. La red se reactiva en 1998.

La tesis de maestría presentada por Ernesto Patricio Núñez Peña en el año 2003 bajo el título de **El Acuífero de Calera, Zacatecas, situación actual y perspectivas para un desarrollo sustentable** tuvo como objetivo analizar y determinar las condiciones del acuífero con la ayuda de información previa. Definió las estructuras y formaciones geológicas (fm) asociadas al comportamiento del flujo. Como resultado, genera una base de datos actualizada y propone un esbozo de estrategias para el manejo sustentable (Núñez Peña, 2003).

Para el año 2010, se establece el **Plan de manejo integral del acuífero Calera en el Estado de Zacatecas** trabajo contratado por la empresa *Ingeniería y Gestión Hídrica S. C.* que tuvo como objetivo mayor *instrumentar una razonable administración del acuífero,*

basada en el consenso y la aplicación de los principios de desarrollo sustentable esto apegado al plan nacional hídrico. Este plan contemplaba ocho objetivos estratégicos como la mejora de la productividad agrícola, aumentar el acceso a los usuarios, manejo integrado de cuencas y acuíferos, un mejor desarrollo técnico - administrativo, cultura del agua y participación de usuarios y ciudadanos, atención a problemas derivados de eventos meteorológicos, Cambio Climático (CC) y sus efectos y la verificación de la administración y la eficiencia del plan (IGH, 2011). Este trabajo contempla un modelo numérico del acuífero generado mediante VMF que contempla un escenario inercial con una proyección a 2040, un escenario REPDa con una extracción constante igual a la generada en 2010 y un escenario de máxima tecnificación con mejoras en el riego y desaparición de pérdidas de agua debido a fugas, con un mejoramiento paulatino hasta 2040.

Una colaboración de la UAZ con *USDA-ARS-Conservation and Production Research Laboratory* y *Boise State University* en el año de 2012 publicaron el artículo **Modeling Groundwater Levels on the Calera Aquifer Region in Central Mexico using Mod-Flow** (Hernández y cols., 2012). Este trabajo tuvo como objetivo general el desarrollo y calibración de un modelo regional integrado de AS usando niveles de agua observados entre 1954 a 2004. Se usaron cuatro años de calibración (1954, 1980, 1985 y 1990) y dos años de validación (1997 y 2004) con errores cuadráticos promedios de 0.65 y un porcentaje promedio de la raíz cuadrada del error de 56 %. La calibración se llevó a cabo ajustando los parámetros más sensibles como la conductividad hidráulica y las tasas de recarga.

La *RWTH-Aachen University* en colaboración la UASLP se llevó a cabo el trabajo de la tesis de doctorado de M. Sc. Lisa Krienen presentada bajo el nombre de **Understanding deep groundwater flow systems to contribute to a sustainable use of the water resource in Mexican Altiplano** (Krienen, 2018). Esta investigación tuvo como objetivo conocer la relación hidráulica (si es que existe) entre los acuíferos de Calera-Benito Juárez en Zac y el acuífero de SLP en la ciudad del mismo nombre y la implementación del comportamiento de los acuíferos bajo esquemas de extracción y recarga. La primera etapa de su investigación consistió en elaborar una descripción y actualización de las características del sitio mediante técnicas geofísicas para finalizar con un modelo hidrogeológico conceptual de ambos sistemas. La segunda etapa fue la implementación de los modelos, la evaluación de escenarios y la presentación de los resultados y conclusiones, la implementación y las simulaciones se realizaron mediante el programa FEFLOW. Al igual que investigaciones anteriores, Krienen da recomendaciones de manejo sustentable del agua, indicando los efectos de no llevar en marcha los planes de gestión integral.

En el entendimiento de la geoquímica del AS se han realizado trabajos relativamente recientes de los que podemos mencionar la nota técnica del año 2013 en la revista del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) llamado **Análisis geoestadístico espacial de cuatro iones mayoritarios y arsénico en el acuífero de Calera** (H. E. Júnez-Ferreira, Bautista-Capetillo, y González-Trinidad, 2013), estableciendo la distribución espacio-temporal de estos iones y el AS mediante geoestadística concluyendo que en general el agua para consumo humano es de buena calidad según la NOM-127-SSA1-1994. Otro trabajo publicado en 2017 fue **Correlation of Arsenic and Fluoride in the groundwater for human con-**

sumption in a semiarid region of Mexico (Navarro, González, Júnez-Ferreira, Bautista, y Cardona, 2017) cuyo objetivo fue el determinar la correlación actual entre el As y el F debida a la interacción Roca-agua, teniendo interés en los puntos de extracción de agua para consumo humano. El trabajo concluye que existen ciertos puntos con concentraciones cercanas al límite máximo permisible e indican que las causas posibles son: del tipo antropogénico debido a la extracción minera y otro natural, ya que se han asociado la presencia de As en depósitos aluviales que facilitan la disolución de minerales que contienen dicho elemento.

En esta misma línea, el estudio de isótopos para el entendimiento de los sistemas de flujo se han realizado en el Aq Cal, está el caso del artículo publicado bajo el nombre de **Identifying Groundwater Recharge Sites through Environmental Stable Isotopes in an Alluvial Aquifer** del año 2017 cuyo objetivo fue caracterizar la isotopía del agua de lluvia y comprender el funcionamiento del flujo y establecer posibles zonas de recarga (González-Trinidad, Pacheco-Guerrero, Júnez-Ferreira, Bautista-Capetillo, y Hernández-Antonio, 2017). Del mismo posgrado en ingeniería de la UAZ se originó el estudio llamado **Spatio-Temporal Analysis of Natural and Anthropogenic Arsenic Sources in Groundwater Flow Systems** del año 2018 y **Integration of Isotopic (2H and ^{18}O) and Geophysical Applications to Define a Groundwater Conceptual Model in Semiarid Regions** del año 2019 (Avila-Sandoval y cols., 2018) (Anuard y cols., 2019).

Diversas investigaciones realizadas en la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ) han sido encaminadas a la aplicación geoestadística para la comprensión de diversos parámetros relacionados con el agua subterránea de los cuales podemos destacar la evaluación de una metodología para diseñar una red de monitoreo de calidad de agua tomando en cuenta índices de vulnerabilidad en el acuífero de Calera (H. Júnez-Ferreira, González, Reyes, y Herrera, 2016). De menara simultanea se estudiaron la distribución de diversos parámetros (arsénico, calcio, cloruros, sodio y sulfatos) e índices de vulnerabilidad, es decir, la susceptibilidad del acuífero a ser contaminado por la infiltración de contaminantes en la superficie. Estos índices se establecieron mediante la metodología DRASTIC(H. Júnez-Ferreira y cols., 2016). Siguiendo esta línea del diseño de redes de monitoreo, Cázares-Escareño (2022) creó una metodología para adquirir la mayor cantidad de información de una red piezométrica con el menor coste de traslado (Cázares Escareño, Júnez-Ferreira, González-Trinidad, Bautista-Capetillo, y Robles Roveló, 2022). Cázares aplicó análisis geoestadístico para conocer las rutas de recorrido en la recolección de datos de elevación del nivel estático dividiendo al acuífero de Calera en tres zonas de trabajo.

Así mismo a la par de este modelo se desarrolló otro modelo numérico de flujo de agua subterránea del acuífero. Este ha sido implementada mediante FEFLOW el cual es un programa de cómputo que, a diferencia de Visual Modflow que resuelve el sistema mediante el método de diferencias finitas, resuelve la ecuación de flujo mediante el método de elemento finito, además de aplicar la influencia de las fallas geológicas que originan recarga vertical en las zonas donde se ubican.

1.4. Problemática

En el Estado de Zacatecas (Zac) México, se localiza el Aq Cal que coincide en mayor medida con el acuífero administrativo perteneciente a una red de 34 acuíferos administrativos, de los cuales, según la CONAGUA, 13 presentan valores negativos de disponibilidad (38%), es decir, el volumen de recarga natural del acuífero es menor o mucho menor que lo que se extrae. Administrativamente se les conoce como acuíferos "sobree explotados" pero para efectos de este trabajo, los acuíferos con valores negativos de disponibilidad se les denominará, acuíferos con explotación intensiva. En datos de la CONAGUA en los diferentes estudios de disponibilidad publicados en el Diario Oficial de la Federación de 2017 a 2020, la disponibilidad en el acuífero ha sido negativa (en hectómetros cúbicos (hm^3)) sus valores han sido -80.50, -80.49, -74.85, -72.57). Este problema de recarga repercute así mismo, en cuerpos superficiales como afloramiento de manantiales y ríos perennes que dependen casi en su totalidad de AS. Es evidente que las bajas precipitaciones y la extracción intensiva no sólo afecta a las actividades humanas, sino también a los ecosistemas que de ellas dependen.

Ahora bien, aunando a este problema, el clima en la superficie del acuífero es mayoritariamente semiseco estepario según la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García. Con una precipitación media anual de 425 mm y temperatura media anual de 16.3°C (CONAGUA, 2020). Estas bajas precipitaciones hacen que un porcentaje importante del suministro hídrico a los diferentes sectores sea por AS.

Basado en la literatura consultada se tiene la siguiente problemática:

- Para el 2021, el Aq Cal se encuentra en estado de explotación intensiva con un déficit en el balance de 72.573 hm^3 de agua.
- Debido a la baja precipitación de la zona, el abastecimiento público e industrial es en su mayor parte depende de AS. Un volumen concesionado importante es destinado a la agricultura.
- El acuífero presenta 4 vedas de extracción en diferentes zonas, es decir, restricciones en cuanto al aprovechamiento de su agua, dos del tipo II y dos del tipo III. La primera publicada el 16 de mayo de 1960. La segunda el 5 de agosto de 1978, la tercera el 6 de abril de 1981 y finalmente la última el 22 de octubre de 1984. Las cuatro por tiempo indefinido. A pesar de la implementación de vedas, el acuífero sigue presentando números negativos en los balances hídricos.
- 25.63 % de la producción agrícola es de temporal, lo que significa que el 74.37 por ciento de los cultivos son de riego. Esto indica que el cultivo de riego es 2.9 veces mayor al de temporal.
- La población del Estado de Zacatecas (Zac) para el 2020 es de 1 622 138 habitantes. Del Aq Cal dependen los municipios de Zac, Calera, Enrique Estrada, Morelos y Fresnillo, en los cuales viven 455 749 habitantes que representan al 28.1 % de la población del

Estado. Según las estadísticas del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), desde el censo del año 1930 al año 2020 la población ha crecido de aproximadamente 500 mil habitantes a más de un millón y medio, lo que se traduce en que la esperanza de vida ha aumentado, así como la presión en las fuentes de agua.

- Dentro del polígono que enmarca la cuenca que da origen al acuífero de Calera se han localizado zonas de hundimiento del terreno derivado de la subsidencia ocasionada por la explotación intensiva del agua subterránea (Cigna y Tapete, 2022) presentando hundimientos de 22 cm/año (Chaparrosa), 16 cm/año al Este de Fresnillo, San Ramón, San José de Lourdes y El Barril con 12 cm/año (Cigna y Tapete, 2022).

1.5. Justificación

La importancia de la realización de este estudio radica en que del Aq Cal depende un porcentaje importante de la población del Estado (poco más de 28 %), así mismo, que la producción económica que más aporta al producto interno bruto estatal depende principalmente del agua que se extrae en esa zona. De este sector productivo podemos destacar a Minera Saucito S.A. de C.V. y Minera Fresnillo S.A. de C.V. que son las principales productoras de plata en el país, esto según la Cámara Minera de México. También sobresale la cervecera Zacatecas que según la revista Forbes, para 2018, era la planta cervecera más grande del mundo que producía 24 millones de hectolitros al año. Por otra parte, en el sector agrícola, del total del volumen de producción, el 43.63 % se cultiva en los municipios de Calera, Fresnillo y Zac, donde un porcentaje mayoritario de la zona de cultivo se localiza sobre este acuífero. Estos sectores, el poblacional, industrial y agrícola presentan los porcentajes más altos de volúmenes concesionados por la CONAGUA.

Además de la importancia socioeconómica que tiene esta región, por lo cual justifica la prioridad de una correcta gestión del agua, es importante determinar el proceso mediante el cual se administrará, aquí entra la utilización de modelos numéricos para la evaluación de los sistemas de flujo del agua. Para la realización de estos modelos se requiere de gran cantidad de información y conforme esta sea generada, estos pueden ser cada vez más robustos y con mejor precisión en sus pronósticos. El Aq Cal es un acuífero con bastante información confiable para crear un modelo numérico con menor número de simplificaciones y este modelo buscó incorporarlos en el modelo conceptual.

En la actualidad la NOM-011-2015-CONAGUA no contempla la simulación de flujos y la evaluación de escenarios futuros como medio de administración del agua, por lo tanto, esta investigación pretende generarlos para verificar el comportamiento del acuífero en años venideros. Este tipo de gestión basada en modelos beneficia el establecimiento de una mayor seguridad hídrica para los sectores productores mencionados y para el ecosistema que depende de él.

1.6. Objetivos

El objetivo general es **Evaluar a los sistemas de flujo de agua subterránea mediante un modelo numérico en el acuífero de Calera, en Zacatecas, para proponer estrategias de manejo de extracciones en la zona.**

Para el logro del objetivo general, se establecieron los siguientes objetivos particulares:

1. Construir un modelo conceptual de los sistemas de flujo de agua subterránea del acuífero de Calera, con base en estudios hidrológicos e hidrogeológicos, esto para la comprensión de los fenómenos que ocurren en el acuífero.
2. Evaluar la variabilidad climática en la región del acuífero, para posteriormente implementar dichas condiciones en la evaluación de escenarios futuros.
3. Calibrar y validar el modelo numérico de los sistemas de flujo de agua subterránea mediante la implementación del modelo conceptual en un programa de cómputo especializado, esto en regímenes estacionario y transitorio para lograr la representación de las condiciones naturales del acuífero.
4. Evaluar escenarios futuros que contemplen la propuesta de esquemas de aprovechamiento y proyecciones meteorológicas para así conocer la respuesta del acuífero en términos de disponibilidad.
5. Proponer estrategias de gestión para el manejo de extracciones de agua subterránea con énfasis en esquemas de sostenibilidad.

1.7. Metodología de Trabajo

La metodología se estableció de acuerdo con los fines y necesidades de la investigación. A continuación, se presentan cinco puntos principales de esta:

Etapas 1: Para construir el modelo hidrogeológico conceptual primero se realizaron trabajos de reconocimiento del área y de estudios previos para obtener la mayor cantidad de información disponible la cual permitió alimentar el modelo conceptual. Se crearon diferentes archivos en formato Shape (.shp) y Raster (.dem, .grd) con la ayuda de un sistema de información geográfica, para esta investigación se utilizarán *Qgis*, *Arcgis* y *Surfer*. Estos archivos ayudaron a generar diferentes mapas de sitio, estos fueron los archivos de entrada en el programa VMF el cual acepta principalmente este tipo de documentos. Posteriormente se generó la discretización del área superficial del acuífero tomando en cuenta la localización de los pozos de extracción y pozos de verificación. VMF al resolver la ecuación general de flujo de AS con el método de diferencias finitas (MDF), necesita tener una malla de discretizado lo más uniforme posible, con la finalidad de que esto facilite a la resolución de la ecuación y el proceso de calibración no sea tan complicado.

Etapas 2: En esta etapa se hizo una verificación local de los efectos y Variabilidad climática (VC). Al inicio se hizo un análisis de los datos de precipitación y temperatura media, esto mediante pruebas estadísticas, de homogeneidad, independencia y ajuste de datos faltantes por la cual se obtuvo la precipitación media mensual y media anual, así mismo para las temperaturas. Posterior a ello se realizó un análisis de serie de tiempo de los registros históricos de precipitación y temperatura media. Al finalizar se pudieron mostrar las tendencias en el espacio y el tiempo de la precipitación y la temperatura media. Estas tendencias fueron introducidas en el modelo ya sea en forma de infiltración o evapotranspiración.

Etapas 3: El proceso de calibración se describió como una de las etapas críticas de la modelación numérica. En esta se llevaron a cabo simulaciones que permitieron comparar los valores obtenidos en campo (principalmente la piezometría) con los valores que arroja el código. Se fueron ajustando parámetros de entrada y se crearon simplificaciones del modelo conceptual con la finalidad de que los datos simulados no fueran tan distintos con los datos en el acuífero real. Para verificar estas diferencias se utilizaron medidas de error estadísticos como el error cuadrático medio y la raíz cuadrada del error normalizada. Como parte final de esta etapa se elaboró un análisis de sensibilidad de los datos para poder verificar cuales parámetros son más sensibles a los cambios realizados, esto con el propósito de identificar los parámetros que fueron las variables dependientes y las independientes, por ejemplo, el nivel piezométrico como variable dependiente.

Etapas 4: Para esta investigación se evaluaron tres principales escenarios de pronóstico que nos permitieron generar una propuesta del manejo del AS y atender posibles escenarios desfavorables. El primero, un escenario típico el cual consistió en el aumento gradual de extracciones mediante la creación de nuevos pozos, para ello se hizo un análisis de tendencia en el aumento de extracciones y de concesiones con datos históricos otorgados por el REP-DA. Se visualizó cuál sería el comportamiento del acuífero en años posteriores. El segundo escenario propuesto fue encaminado a observar el comportamiento del acuífero debido a los efectos de la VC. Para ello se realizó un estudio que generó indicadores de este efecto para cuantificar el grado del impacto sobre el AS. A partir de esto se implementaron en el modelo numérico los cambios en la recarga vertical. El último escenario se planteó en el sentido de un aumento en la recarga vertical por medio del mejoramiento del suelo y de la implementación de agricultura de conservación. Este proyecto de la mejora de la recarga vertical tomó en cuenta la realización de obras que impidan la erosión y un cambio de uso de suelo en la zona de recarga del acuífero localizada en la parte sur del lugar.

Etapas 5: Como objetivo final de esta investigación se generaron estrategias de manejo de extracciones en el Aq Cal. Estas estrategias se basaron en los resultados obtenidos en las simulaciones anteriores. El propósito de estas estrategias fue mitigar los efectos negativos en el lugar proponiendo soluciones que no signifiquen un freno económico para la región ya que sobre el área de este acuífero se localizan importantes industrias y una gran red de unidades de riego.

Capítulo 2

Modelo conceptual del acuífero de Calera, Zacatecas

2.1. Caracterización de la región del acuífero de Calera, Zacatecas

2.1.1. Ubicación

El Aq Cal se localiza en la parte central del Estado de Zac entre los paralelos $22^{\circ}41'$ y $23^{\circ}24'$ en latitud y $102^{\circ}33'$ y $103^{\circ}01'$ longitud con una superficie de aproximadamente $2,226 \text{ km}^2$. Este acuífero está rodeado por los acuíferos administrativos de Aguanaval, Chupaderos, Guadalupe de las corrientes, Benito Juárez y Jerez. El área de este acuífero cubre la totalidad de los municipios de General Enrique Estrada y Morelos y Calera, y porciones importantes de los municipios de Fresnillo y Zac. También toma parte de los municipios de Vetagrande, Pánuco, Jerez y Villa de Cos.

La cuenca superficial dada por el parteaguas de la zona coincide en gran parte con el polígono que enmarca al acuífero administrativo (línea negra en la figura 2.1 salvo en ciertas regiones como al norte del poblado de Plateros Fresnillo y en la frontera Este en dirección a los límites con el municipio de Villa de Cos con el municipio de Fresnillo). Debido a que el modelo abarcará una región más amplia que la de los dos límites, se podrá utilizar cualquier cualquiera de los dos.

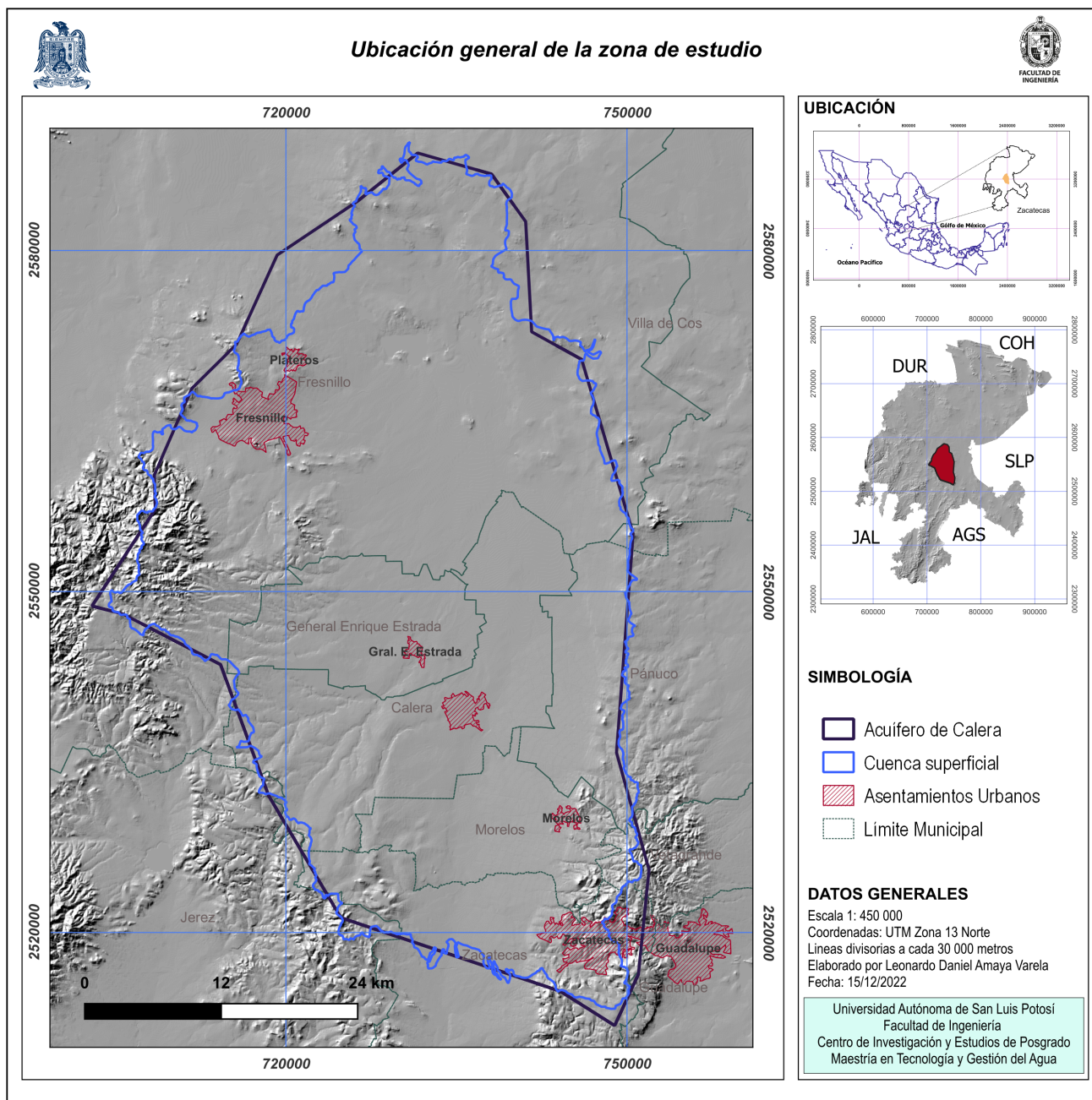


Figura 2.1: Localización de la zona de estudio. Elaborada con datos del INEGI 2020.

Los vértices del polígono que comprende el acuífero administrativo se muestran en el cuadro 2.2 recuperada de (CONAGUA, 2020).

Cuadro 2.1: Coordenadas del polígono que delimita al acuífero administrativo. Elaborada con datos de CONAGUA 2020.

Vértice	Grados	Minutos	Segundos	Grados	Minutos	Segundos
1	102	38	31.9	23	20	5.3
2	102	38	18.9	23	14	50.0
3	102	35	45.8	23	13	28.7
4	102	33	15.7	23	05	8.6
5	102	34	18.2	22	54	43.4
6	102	32	44	22	49	6.8
7	102	33	22	22	44	8.9
8	102	34	37.8	22	41	43.2
9	102	37	23	22	43	23.7
10	102	48	36.1	22	47	3.9
11	102	52	13.0	22	52	55.5
12	102	54	35.7	22	59	12.4
13	102	59	34.9	23	01	41.1
14	103	01	10.1	23	02	4.9
15	102	57	50.5	23	06	39.0
16	102	57	52.0	23	08	17.0
17	102	55	51.7	23	12	23.3
18	102	53	32.1	23	14	27.2
19	102	51	22.4	23	18	40.8
20	102	47	12.7	23	21	10.2
21	102	44	2.3	23	23	26.2
22	102	40	15.2	23	22	22.7

2.1.2. Hidrología superficial

La región del Aq Cal pertenece a la región hidrológica No. 37 El Salado y en menor medida dentro de la región No. 36 Nazas - Aguanaval. La cuenca que da origen a la región del Aq Cal es cerrada en el sur y está rodeada de lomeríos a excepción de su parte norte donde conecta con los acuíferos administrativos de Aguanaval, Chupaderos y Guadalupe de las Corrientes. Las subcuencas (ver 2.2) que conforman esta región administrativa son la **RH36Dh** Río Trujillo, la **RH12Ja** Río Juchipila-Malpaso, **RH12Ki** Río Jerez, **RH37Ea** Yesca y la subcuenca **RH37Ec** Fresnillo, siendo esta última la que tiene un porcentaje mayor dentro del área del Aq Cal.

No se localizan escurrimientos importantes, sólo arroyos intermitentes y agua que escurre de la Sierra de Zac y la Sierra de Fresnillo (IGH, 2011). De estos arroyos destaca La joya que recibe aportes de los arroyos El bote, Rancho Nuevo y El Molino, también destaca el arroyo Calera que se origina de la aportación de los escurrimientos de los arroyos Plateros, Carrizalillo, El de Enmedio y Hornitos (CONAGUA, 2020) estas corrientes confluyen en las lagunas Santa Ana y Sedano.

En el *Plan Hídrico de los acuíferos Aguanaval, Chupaderos y Calera* realizado por la UAZ en el año 2008 se estimó que dentro del Aq Cal existía un almacenamiento de tan sólo 13.2 hm^3 lo que indica la importancia del AS para el desarrollo integral de la zona.

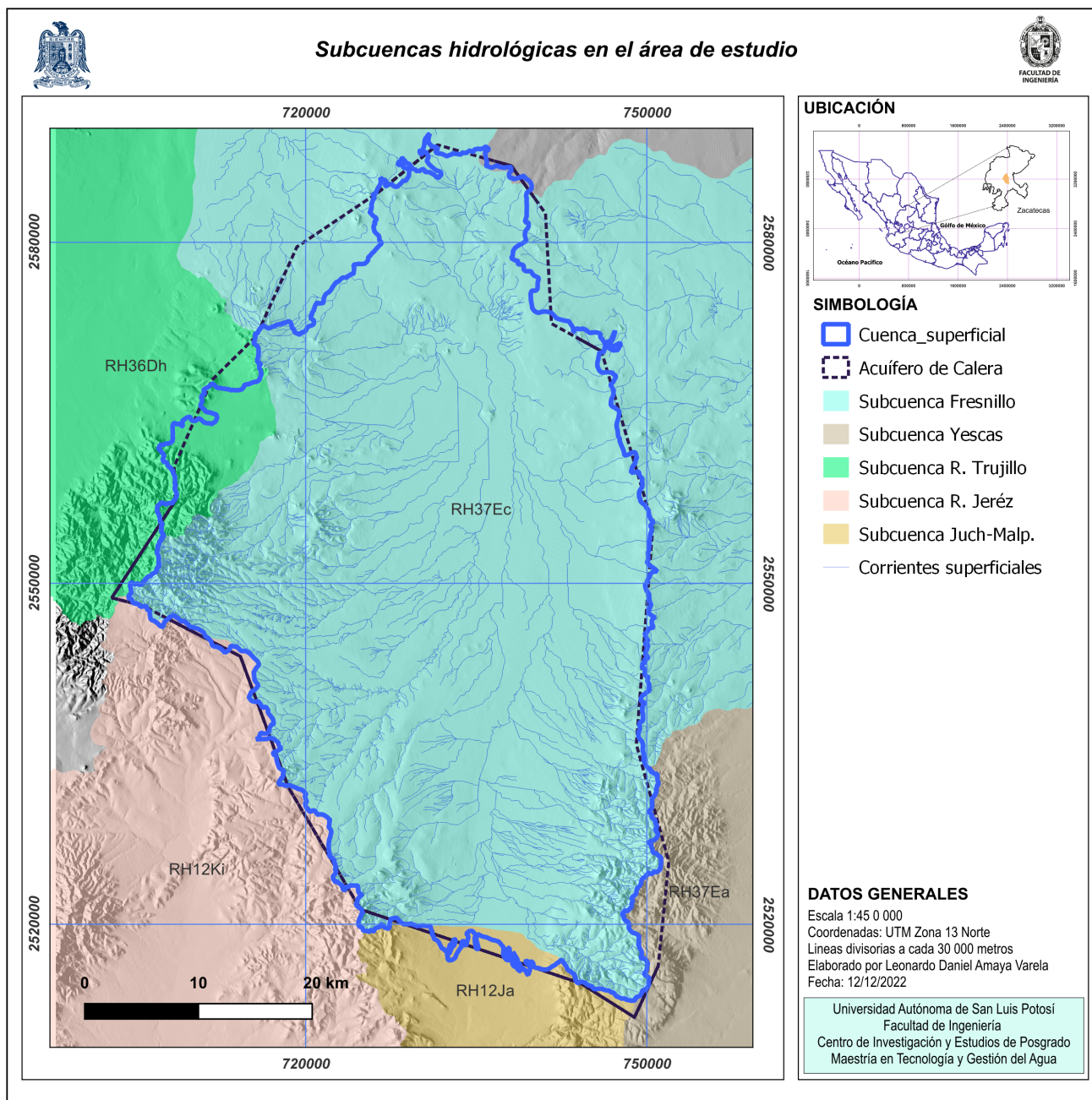


Figura 2.2: Subcuencas hidrográficas dentro de la zona de estudio. Elaboración con datos del INEGI 2010.

2.1.3. Clima

El clima general en el Estado de Zac se puede definir como un clima subtropical, sin embargo, en la zona de estudio del Aq Cal el clima puede pasar a ser semiárido, una característica particular de la región del Altiplano mexicano. Según la clasificación Köppen modificada por Enriqueta García para la República Mexicana, la zona de estudio está caracterizada por tener un clima semiárido (**BS1kw**) con temperatura media anual entre 12

- 18°C y precipitaciones máximas en verano (CONAGUA, 2020) (García, 1964). En el año 2013 Francisco Mojarro Dávila en la descripción general del Aq Cal aplicó un índice de aridez el cual resulta de dividir la precipitación y la evapotranspiración de referencia (modificada para usar la evaporación de un tanque tipo A) clasificando a la región como *árida* con un índice de 0.2 (citado por Verbist, Santibañez, Gabriel y Soto en el 2010) (Mojarro Dávila, De León Mojarro, Júnez Ferreira, y Bautista Capetillo, 2013).

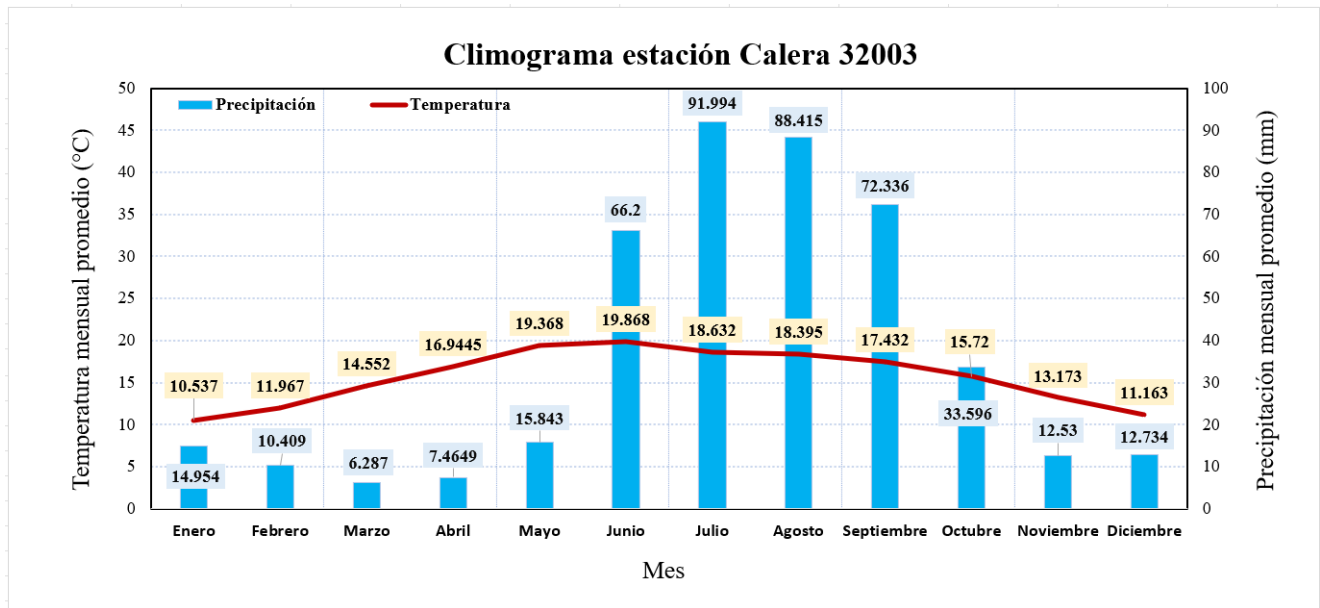


Figura 2.3: Climograma de la Estación climática Calera (32003). Elaboración con datos de la CONAGUA (1957-2018).

2.1.4. Geología

A nivel regional, la zona central de México está compuesta por tres terrenos tectonoestratigráficos según lo definido por Coney y Campa en el año de 1983. Estos son el Terreno Sierra Madre, Terreno Guerrero y Terreno Sierra Madre Occidental (Nuñez Peña, 2003).

1. **Terreno Sierra Madre:** Terreno compuesto principalmente de carbonatos y depósitos de origen marítimo cuyas edades van del Jurásico tardío al Cretácico (Nuñez Peña, 2003). Son afines a este Terreno las formaciones (fm) La Ballena y la fm Zacatecas.
2. **Terreno Guerrero:** Es uno de los Terrenos más grandes de la Cordillera Norteamericana y se caracteriza por una secuencia de rocas vulcano-sedimentarias y almohadillas basáltico adesíticas de edades que van del Jurásico Superior al Cretácico inferior (Centeno-García, Ruiz, Coney, Patchett, y Ortega-Gutiérrez, 1993) (Nuñez Peña, 2003). Son afines a este Terreno la fm Chilitos, Saucito y La Borda.
3. **Terreno Sierra Madre Occidental:** Compuesto en general de rocas volcánicas que MacDowell en 1979 dividió en dos grandes conjuntos (Complejo volcánico inferior y

superior). El primero compuesto de rocas andesíticas e intrusivas félsicas y el segundo con componentes de rocas riolíticas y algunas rocas andesíticas (Nuñez Peña, 2003).

La evolución geológica del lugar de estudio se deriva de una serie de eventos tectónicos originados en el Triásico (Nuñez Peña, 2003), este cambio se integra dentro de la evolución de la región fisiográfica de la Mesa Central la cual es una región caracterizada por elevadas montañas que flaquean a grandes valles planos. Delimitan a esta región en el norte y el oriente por las Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental (Nieto-Samaniego, Alaniz-Álvarez, y Camprubí Cano, 2005). Se hará referencia al modelo evolutivo propuesto por Centeno-García y Silva - Romo en 1997 citados por Núñez, Ernesto en 2003 el cual refiere al modelo evolutivo que da origen a la fm Zacatecas del Terreno Sierra Madre (Modelo 1).

Durante el Triásico tardío (inciso a) ocurren la deposición de las formaciones más antiguas, la fm marina turbidítica La Ballena con composiciones de areniscas limolitas y lutitas y la fm Zacatecas compuesta de un depósito vulcanosedimentario (Centeno-García y Silva-Romo, 1997).

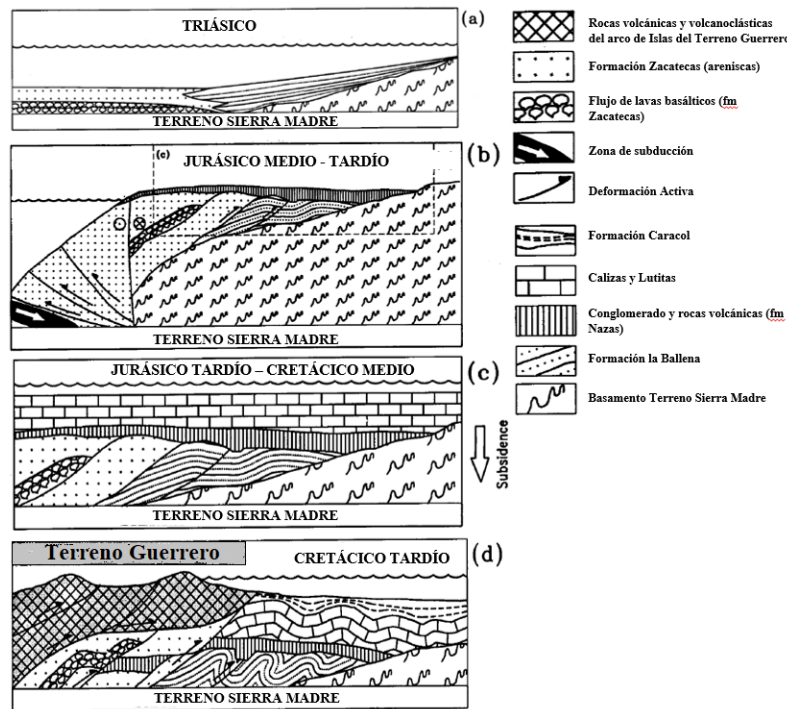


Figura 2.4: Evolución tectónica de la región (Modelo 1) tomado de Centeno-García y Silva-Romo, 1997.

Durante el Jurásico medio al tardío (inciso b) ocurren el proceso de subducción de la placa Farallón sobre la placa norteamericana generando sedimentos sobre la fm Zacatecas (Nuñez Peña, 2003) (Centeno-García y Silva-Romo, 1997). Durante la etapa del Jurásico tardío al Cretácico Medio, depósitos de sedimentos parecen envolver a una profunda plataforma continental (Centeno-García y Silva-Romo, 1997). Al inicio del Cretácico la subsidencia originada en la primera etapa, se desacelera debido a un enfriamiento cortical generando depósitos calcáreos de plataforma de gran espesor (Nuñez Peña, 2003). En el Cretácico Tardío,

probablemente ocurren gran cantidad de eventos tectónicos (inciso c). Al final de esta era, probablemente existió un empuje del Terreno Guerrero sobre la fm Zac, los sedimentos de la fm Caracol se derivaron de la erosión del Terreno Guerrero (inciso d) (Centeno-García y Silva-Romo, 1997).

2.1.4.1. Estratigrafía

A nivel local (Aq Cal) la estratigrafía está compuesta de rocas vulcanosedimentarias y sedimentos de rocas ígneas y metamórficas pertenecientes a los terrenos Guerrero y Sierra Madre. En esta sección se describen 13 fm geológicas que son comunes en la zona de estudio teniendo inicio en el Jurásico hasta el Cuaternario.

■ JURÁSICO - CRETÁCICO INFERIOR:

Formación Chilitos J(ch): Perteneciente al Jurásico Sup. esta fm se caracteriza por estar compuesta de rocas verdes pertenecientes a una secuencia de lavas andesíticas oscuras, tonos rojos y verduscos con forma de almohadillas, esta fm fue descrita inicialmente por Cserna en 1972 (CONAGUA, 2020) (de Cserna, 1976). Su nombre deriva del afloramiento sobre el Terreno Guerrero en el Río Chilitos. Esta fm es una secuencia de rocas vulcanosedimentarias de lavas masivas basáltico-andesíticas con algunas intercalaciones de sedimentos vulcanoclásticos que cabalgan sobre la fm Zac. Tiene una correlación dentro de distritos mineros en Zacatecas con la secuencia de rocas andesíticas de color verde (de Cserna, 1976).

Formación Valdecañas (Jva):

Secuencia de rocas areniscas y calizas con afloramientos en la región del arroyo Chilitos y la población de Valdecañas. Estas están representadas por grauvacas rojizas interestratificadas de poco espesor dentro de una matriz arcillosa compuestas con hematitas, limonitas y calcitas.

■ TRIÁSICO SUPERIOR:

Formación Zacatecas (TR(E)):

Formación ubicada al noreste de la capital del Estado en el arroyo La Pimienta y es de las más antiguas de la región. Denominada por Carrillo Bravo en 1971 basándose en los trabajos previos de Burckhardt y Scali(1906)(Nuñez Peña, 2003) la fm Zac está tectónicamente sobre puesta por lavas basálticas y andesíticas y rocas vulcanoclásticas con metamorfismos de facies de esquistos verdes (Centeno-García y Silva-Romo, 1997). Ranson (1982) reconoce estratigráficamente dos miembros principales, uno de filitas (Nuñez Peña, 2003) grises y verdosas dado el contenido de hematita, y otro de metacuarcitas compactas de color gris rosado. En esta tienen presencia elementos hidrotermales de cuarzo lechoso (CONAGUA, 2015).

■ CRETÁCICO INFERIOR:

Grupo Proaño (Ki(lu-ar)):

Unidades litológicas identificadas por Stone y McCarthy (1942) y definidas como formación por Hungler (1967). Esta fm está constituida por tres unidades litológicas de composición arenisca, lutitas carbonosas y nuevamente areniscas (Nuñez Peña, 2003) de origen marino ocurriendo en depósitos de aguas profundas (de Cserna, 1976). Es

típica de la región de Fresnillo Zac y Plateros con direcciones norte-sur. Este grupo da origen a dos fm, la fm Valdecañas (ya descrita anteriormente) y la fm Plateros (de Cserna, 1976). La última compuesta de lutitas carbonosa a calcárea en espesores de 150 m y grauvacas de color gris y café. Este grupo está sobre un contacto de falla inversa de la secuencia vulcanosedimentaria indiferenciada.

Formación Cuesta del Cura (Ki(cz)):

Perteneciente al Cretácico temprano (Albiano), la fm Cuesta del Cura es una fm compuesta de calizas en capas delgadas e intercalaciones de arcillas y bandas de pedernal, fue propuesta por Imlay (1936). Esta fm tiene lugar principalmente en Parras Coahuila donde se encuentra expuesta (Imlay, 1936) con un espesor en el sur de 76 m a 300 m en su parte norte (Imlay, 1938) y en la zona del acuífero se observa en los anticlinales y según el estudio de disponibilidad del acuífero es parte del basamento geohidrológico por ser de baja permeabilidad y subyace a los depósitos permeables y fracturados.

Formación Indidura (Ki(cz-lu)):

Descrita originalmente por Kelly en 1936 en Delicias Coahuila colocándola dentro del Cenomaniano-Turoniano y Bose y Cavis la colocan dentro del Albiano medio - Coniaciano (Imlay, 1938). Barbosa-Luna (1998) la describe como una fm se caracteriza por tener rocas areniscas y lutitas de color crema que se van alternando con estructura laminar delgada. Imlay (1936) describe cinco miembros de esta fm, el primero, que el espesor es muy variante con el mayor espesor en la porción sur-oeste donde se observan capas de yeso que cubren a la fm Cuesta del Cura, el segundo miembro lo componen lutitas pasando al tercero donde son comunes las lutitas-areniscas. El cuarto presenta además de lutitas, caliza negra y finalmente el quinto presenta caliza-lutita. Esta fm se distribuye en porciones de Sierra de Parras Coahuila pasando por Durango en regiones de las sierras de Mapimí y Rosario, San Lorenzo y el sureste de Vallecillos. En general su espesor variante va de los 13 m a los 2500 m.

Formación Caracol (Ks(lu-ar)):

Formación inicialmente descrita por Imlay (1937) estableciéndola en el Coniaciano pero en 1944 Imlay sugiere que abarca del Coniaciano al Santoniano. Petróleos Mexicanos (1988) la establece del Coniaciano al Maastrichtiano. Litológicamente se forma por la sucesión de arenisca - lutita con arenisca que va cambiando de grano fino a medio con una matriz calcárea de color café oscuro. Esta fm tiene grandes afloramientos en el estado de Coahuila (Sierra Garambullo), al igual que la fm Indidura tiene aparición en Durango. Pequeños afloramientos se reflejan en la Sierra de San Francisco Coahuila y en la Sierra del Gabán en Zacatecas (Ledezma-Guerrero, 1967). Sus espesores son irregulares y varían de 200 m a 1000 m.

■ TERCIARIO:

Conglomerado rojo zacatecano (Ti(cg))

Denominado inicialmente por Botsford (1909) como conglomerado Guanajuato y en 1988 denominado Conglomerado rojo de Zacatecas por Ponce-Sibaja y Clark (Tristán-González, Torres Hernández, Labarthe-Hernández, Aguillón-Robles, y Yza-Guzmán, 2012). Fue ubicada dentro del Paleoceno-Eoceno por Nájera-Garza en 1997. Esta fm

aflora en las cercanías de la ciudad de Zacatecas como una secuencia de lechos rojizos. La secuencia tiene en mayor cantidad rocas volcánicas silicificadas de color verde, así mismo, se observa cuarzo lechoso, calcedonia, granito y caliza y areniscas (Tristán-González y cols., 2012). En cuanto a su espesor es variable siendo menor hacia el noroeste adentrándose en el centro de la ciudad, pueden observarse espesores de hasta 200 metros estimados por Stone (1956) quien había nombrado a esta fm como aglomerado Zacatecas. Este depósito descansa sobre la unidad vulcanosedimentaria y subyace a los depósitos volcanoclásticos (Tristán-González y cols., 2012).

Ignimbritas y riolitas

En la parte sur del Aq Cal cercano al acuífero de Chupaderos y el poblado de Trancoso se observan afloramientos de flujos piroclásticos soldados y flujos de lava riolítica (CONAGUA, 2020). Las ignimbritas se caracterizan por ser rocas extrusivas con muestras de matriz microcristalina, en el caso de la zona descrita, estas tienen una tonalidad parda con espesores menores, apenas unos cuantos y dan origen a las mesetas ubicadas en las inmediaciones del poblado de Trancoso. Respecto al flujo de lavas riolíticas, estas se presentan como rocas compactas y resistentes lo que origina una baja permeabilidad, su espesor ronda los 100 m. Su origen posiblemente se debe a las emisiones de flujos volcánicos de la secuencia volcánica de la Sierra Madre Occidental dentro del Oligoceno-Mioceno (CONAGUA, 2020).

Tobas riolíticas (Tom(R))

Sobre el conjunto de rocas antes descritas descansa otro flujo piroclástico de estructura masiva y origen volcánico que se presenta comúnmente cercano a la población de Guadalupe al Sureste del Aq Cal. Las tobas riolíticas se observan como rocas de color crema de estructura masiva con fragmentos de pómez, cuarzo y líticos de 15 cm de diámetro con hasta seis metros de espesor. Su origen se debe también a los procesos volcánicos de la Sierra Madre Occidental pudiendo catalogar su edad dentro del Oligoceno-Mioceno.

Formación Santa Inés (Ts(cg))

El conglomerado polimítico está representado por la fm Santa Inés descrita por Pantoja-Alor (1963) la cual definió como una secuencia de sedimentos clásticos conformados por gravas poco consolidadas a conglomerados cementados por arcillas, limos y caliches y colocó dentro de la edad del Pleistoceno del temprano al tardío (Córdoba y Mora, 1989). Se puede dividir a esta fm en tres miembros, el primero el más profundo lo componen conglomerados y areniscas claras originadas a partir de rocas ígneas, el segundo, miembro medio lo componen areniscas de granos finos a medio (Córdoba y Mora, 1989) de rocas de origen también volcánico. El tercero el superior lo compone una matriz rojiza de rocas volcánicas y cuarzos de un espesor aproximado de 50m. Esta fm rellena fosas tectónicas a lo largo de sistemas de cuencas y sierras como el Aq Cal y sobre esta descansan principalmente depósitos aluviales del Cuaternario.

■ CUATERNARIO:

Basaltos (Q(B)):

Unidad que aflora en la parte norte del Aq Cal cercano a la ciudad de Fresnillo Zac (CONAGUA, 2020). Los Basaltos son de origen volcánico que generalmente son de composición vítrea de grano fino. El Basalto presentado en la zona señalada es del tipo

olivino.

Aluvión (Q(al)):

El aluvión se define como los sedimentos que resultan de la erosión de rocas existentes en el área de estudio y que se depositan en grandes áreas (Nuñez Peña, 2003). Su distribución abarca gran parte de la zona y son característicos de los depósitos a pie de monte y porciones bajas de corrientes fluviales. En la región norte del Aq Cal descansa sobre el conglomerado polimítico de la fm Santa Inés y en dirección al sur en las cercanías de las comunidades de Calera, El Maguey, Francisco I. Madero y Zacatecas, este depósito se asienta sobre las rocas volcánicas y sobre la secuencia vulcanosedimentaria (Nuñez Peña, 2003). Su composición es dendrítica constituida por gravas y arenas e intercalaciones de limos y arcillas no consolidados. Tanto este depósito como el conglomerado polimítico representan la parte granular del acuífero.

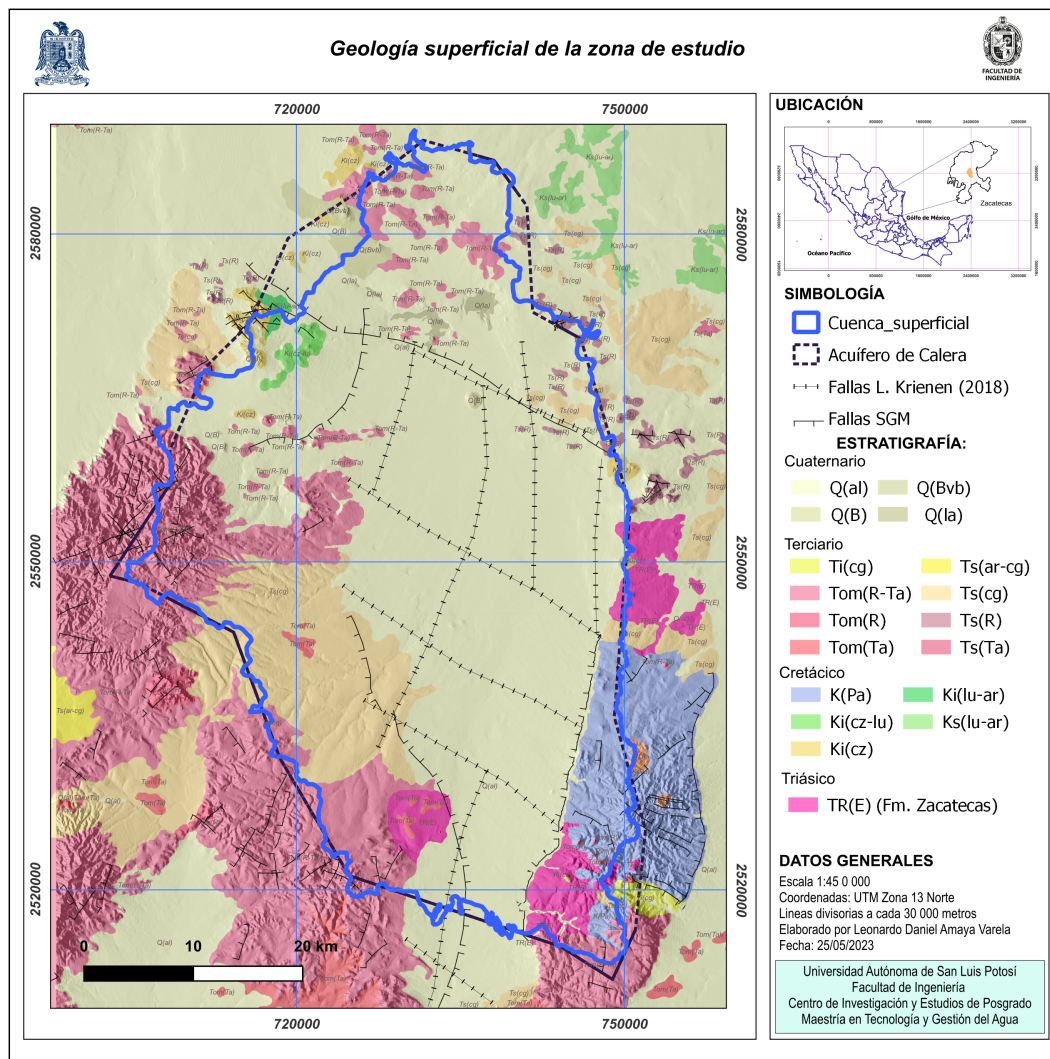


Figura 2.5: Geología superficial del acuífero de Calera. Elaborada con datos del Servicio Geológico Mexicano (1997-2011), Krien L. (2018), INEGI (2011).

2.1.5. Tipo de suelo y uso de suelo

En el área de estudio se localizaron once tipos distintos de suelos con presencia de ocho tipos de uso del suelo (vegetación o actividad humana). Los tipos de suelos se describen a continuación y se les ha asignado una clasificación según la *U. S. Soil Conservation Service (SCS)*.

1. **Calcisol:** Este tipo de suelo se caracteriza por su contenido de material calcáreo (más del 15 % de carbonato) (Inegi, 2004). Estos suelos se localizan comúnmente en ambientes áridos y semiáridos, se originan en depósitos aluviales y coluviales de material meteorizado (lutita-areniscas) (FAO, 2008). Estos suelos se encuentran principalmente en los estados de Chihuahua, Coahuila, Sonora, SLP y Zac. Este tipo de suelo tiene asociada vegetación xerófila y pastos efímeros (Inegi, 2004). Es más utilizado el riego por surco que por inundación. Se asocia al grupo hidrológico **B**.
2. **Fluvisol:** Su nombre deriva de río ya que su característica principal es que contiene una gran cantidad de material fluvial y depósitos lacustres marinos en planicies de inundación (Inegi, 2004). Son suelos jóvenes. No tienen asociado un clima en particular, se encuentran en la mayoría, pero un gran porcentaje se localiza en los trópicos (FAO, 2008). Cuentan con gran capacidad de drenaje y por ello el sistema de inundación en riego es el favorable. Se asignó al grupo hidrológico **A**.
3. **Gleysol:** Son suelos en presencia de nivel freático la mayor parte del tiempo, por lo que son comunes en humedales y pantanos (FAO, 2008), presentan sulfuros de hierro y metano lo que da origen a manchas verduzcas y azuladas. Su material parental es variado, pero se producen principalmente de los fluviales, marinos y lacustres. En México tienen mayor presencia en los pantanos de Tabasco y en Veracruz, son utilizados en el cultivo de pastizales y tienen asociada vegetación tular, manglas y popal (Inegi, 2004). Su grupo hidrológico fue fijado en el **B**.
4. **Kastanozem:** Suelos que se localizan particularmente en climas áridos o semiáridos (FAO, 2008)(Inegi, 2004). En la república mexicana se encuentran en mayor medida en las llanuras de Coahuila, Nuevo León, SLP y Zac. Su color oscuro está dado por la presencia de humus y son originados de diversos materiales no consolidados sobre *loess* que son materiales sedimentarios limosos (FAO, 2008). La vegetación común son los pastizales bajos que son zonas de pastoreo o zonas agrícolas en descanso. Se catalogó en el grupo **C**.
5. **Leptosol:** Se nombró así ya que *Leptos* en griego significa delgado o fino y en promedio estos suelos tienen espesores de 25 cm. Una gran cantidad del volumen de estos suelos se ocupa por rocas y gravas y su presencia se centra en las zonas montañosas (Inegi, 2004). Su material parental deriva de varios tipos de rocas y como ya se mencionó, aproximadamente sólo el 20 % es material fino(FAO, 2008). Comunes en climas secos y fríos y en México se localizan a pie de la Sierra Madre Occidental en áreas erosionadas. Normalmente las rocas que se presentan tienen baja meteorización. Se clasifica dentro del grupo hidrológico **A**.

6. **Luvisol:** Es especial el alto contenido de arcilla que por procesos de pedogenéticos se asienta en la parte inferior del suelo y su composición se debe a la erosión de materiales que da origen a depósitos aluviales y coluviales (FAO, 2008). No se presentan en un tipo de clima particular, pero se presentan en sistemas mediterráneos. En México es el quinto con mayor extensión en la Mesa Central. Los bosques de pinos de la Sierra Madre Occidental se presentan sobre estos suelos. Debido a su contenido de arcilla, se clasificó dentro del grupo **D**.
7. **Phaeozem:** El nombre de este suelo significa *suelo oscuro* y este color característico es dado por la presencia de *humus* y son parecidos al Kastanozem con presencia de *loess* (FAO, 2008). Se presentan principalmente en climas semisecos y semihúmedos. Por su alto contenido en magnesio y potasio son los suelos más importantes en la agricultura mexicana figurando en los estados de Jalisco, Querétaro, Hidalgo y Guanajuato. Se ha clasificado como suelo tipo **C**.
8. **Regosol:** Son el conjunto de suelos que por sus características no pudieron formar parte de otro grupo, esto conforme a su escasa mineralización (FAO, 2008). No son ricos ni en gravas o arenas o material fluvial. Se localizan en zonas secas y montañosas y se derivan de materiales no consolidados de granos finos, contienen rocas y se parecen mucho al material que les dio origen (Inegi, 2004). Se colocó dentro del grupo **B**.
9. **Solonchak:** Su nombramiento define la presencia de alto contenido de sales solubles, comunes en áreas con alta evapotranspiración (por ello la acumulación de sales) como las zonas climáticas áridas y semiáridas. Su material parental es cualquiera que no esté consolidado (FAO, 2008). Esta acumulación de sales origina un ambiente de retención de agua y afecta en la absorción de agua por parte de las plantas. Su influencia marina hace que sean comunes en los deltas de ríos, en México se pueden apreciar en diversos deltas de Sonora y Sinaloa (Inegi, 2004). Se ha categorizado dentro del grupo hidrológico **C**.
10. **Solonetz:** Suelos con capas sub superficiales con gran presencia de arcillas, además, que son suelos alcalinos con altos niveles de sodio y magnesio lo cual no es recomendable para la agricultura (FAO, 2008). Se originan de ambientes de materiales no consolidados de sedimentos de textura fina. Están ubicados preferentemente en climas cálidos costeros. Su manifestación en México se localiza en la parte norte en los estados de Chihuahua y Coahuila con vegetación halófila (Inegi, 2004). Debido a la presencia importante de arcillas se define dentro del grupo hidrológico **D**.
11. **Umbrisol:** Derivado de *umbra* que significa *sombra*, estos suelos se presentan en climas templados húmedos o semihúmedos montañosos los cuales debido a la presencia de gran vegetación tienen contenido orgánico lo que le da su color oscuro (Inegi, 2004). Se derivan de material meteorizado de rocas con sílice (FAO, 2008). Son erosionables debido a la tala de bosques donde se localizan. Debido al tipo de vegetación y altura donde se localiza se puede definir que tiene buena capacidad de drenaje por lo que se clasifica en el grupo **B**.

En el uso de suelo gran parte de la zona del acuífero (zona del valle) es ocupada por un sistema de unidades de riego y temporal la cual es una de las principales actividades en la región. Las zonas de cultivo representan aproximadamente el 57 % del área total, seguido por un área importante de pastizal natural con el 23.28 %. El resto de tipo de vegetación, así como los cuerpos de agua y zonas urbanas e industriales tan sólo representan el 19.6 % restante del área lo cual visualiza que el principal uso de agua en la zona sea el uso agrícola.

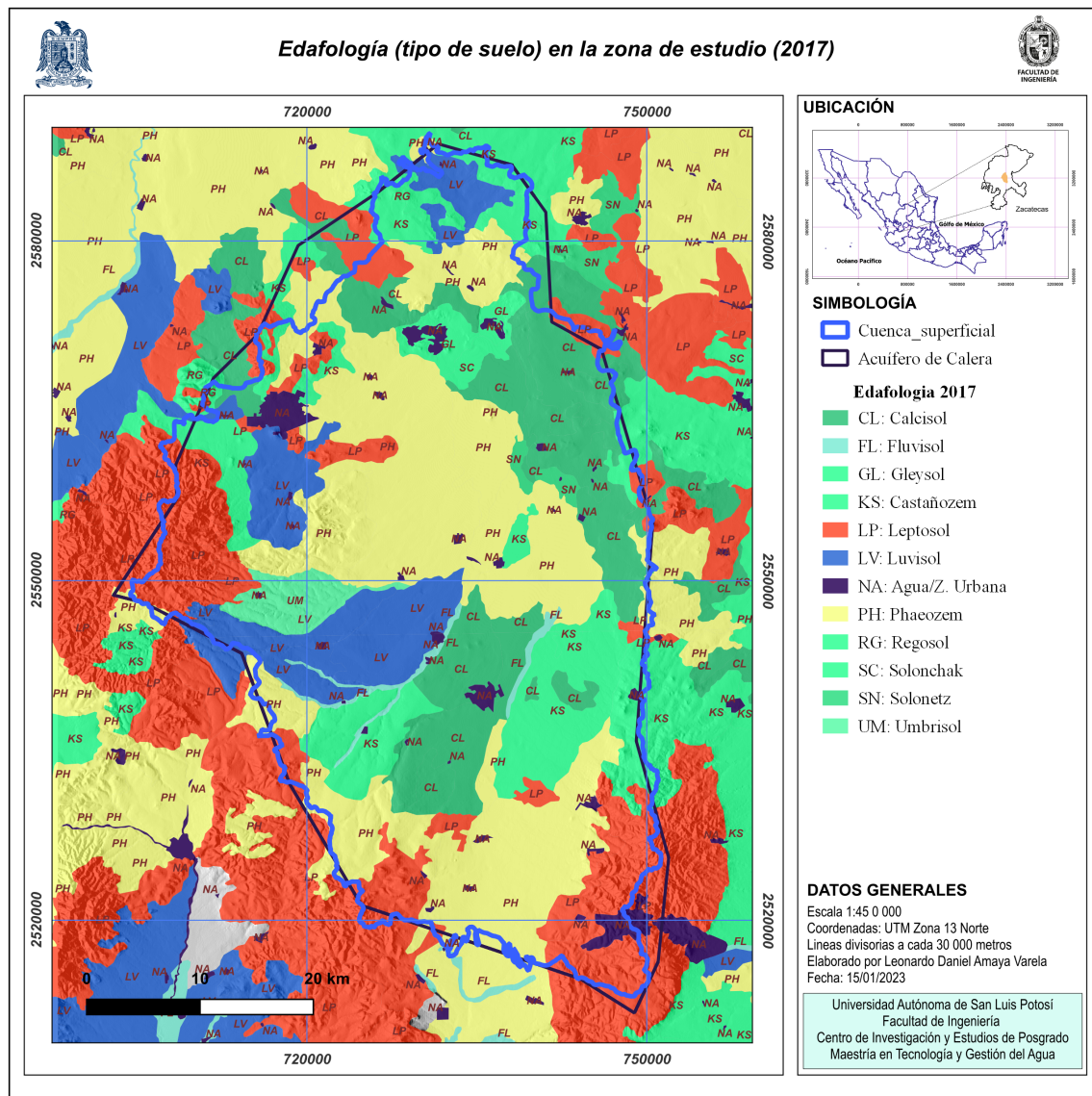


Figura 2.6: Edafología (tipos de suelos) en la zona de estudio. Elaborada con datos del INEGI (2007).

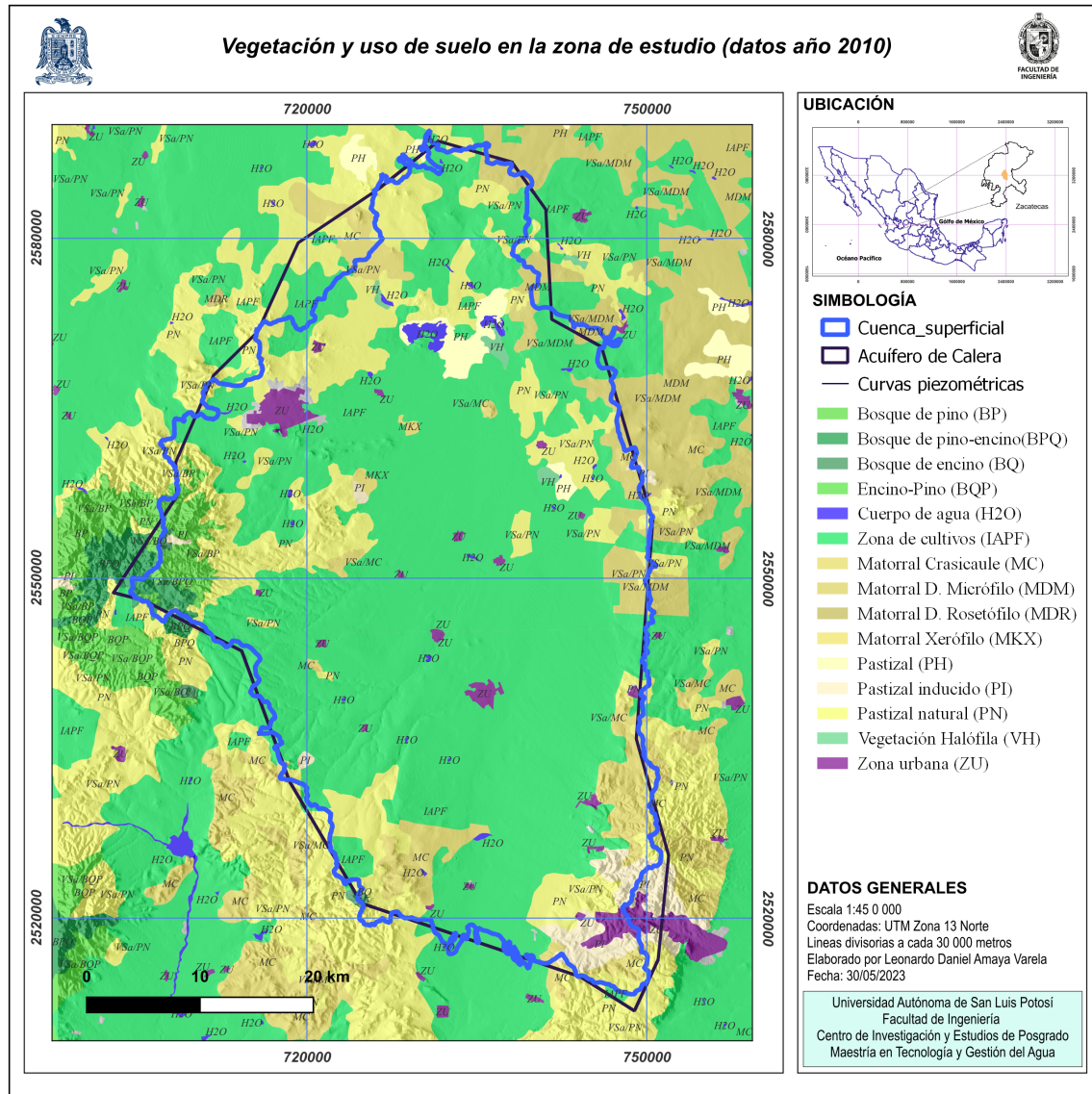


Figura 2.7: Vegetación y uso de suelo sobre el acuífero de Calera. Elaborada con datos del INEGI (2010).

2.1.6. Calidad del agua

Como parte del entendimiento de los procesos que sufre el agua en el Aq Cal es importante comprender las características fisicoquímicas del agua ya que estas nos pueden dar información importante del comportamiento del flujo y la calidad del agua. Para ello se realizaron campañas de muestreo de agua en la zona en el mes de septiembre del año 2004 por la empresa Ariel Consultores. Estas consistieron en recolectar datos de 95 pozos. Los parámetros analizados fueron: pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, alcalinidad y elementos mayores, menores y traza. Así mismo el análisis realizado incluyó datos de isótopos como ^{18}O e 2H los cuales son útiles en la datación del agua y su origen(Clark, 2015).

Con esta información se determinaron las familias de agua a partir de los porcentajes en miliequivalentes de los elementos mayores (HCO_3 , Cl , SO_4 , Na , K , Ca y Mg), lo que resultó en siete familias:

- Bicarbonatada mixta
- Bicarbonatada cálcica
- Bicarbonatada sódica
- Mixta cálcica
- Mixta sódica
- Sulfatada mixta
- Sulfatada sódica

42 de las 95 muestras caen dentro del tipo bicarbonatada mixta seguida de la bicarbonatada cálcica con 29 muestras y 17 de las muestras se clasificaron como bicarbonatadas sódicas. Existen diversas formas de visualizar los resultados de los análisis químicos, uno es el diagrama de Piper el cual consiste en dos triángulos base y un diamante en la parte superior. El triángulo derecho representa las concentraciones en miliequivalentes por litro de los aniones y el izquierdo el de los cationes, estas concentraciones se proyectan sobre el diamante y con base en diferentes clasificaciones se pueden determinar los tipos de agua y las familias (Clark, 2015). Mediante un diagrama de Piper es visible la distribución de las muestras y lo tipos de agua. Cerca del 92 % de las muestras son aguas bicarbonatadas. Las muestras dentro de la región $Ca/MgHCO_3$ son aguas subterráneas bicarbonatadas cercanas a la superficie y las $Na/KHCO_3$ son aguas bicarbonatadas blandas donde la sal iónica del álcali es reemplazada por minerales alcalinotérreos (Clark, 2015), las otras dos corresponden a aguas salinas, las cálcico-magnésicas son dominadas por minerales alcalinotérreos y el las otras el sodio domina la salinidad.

En México la calidad del agua para uso y consumo humano (uso importante dentro de la zona) está reglamentada por la NOM-127-SSA1-2021 llamada **Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua** la cual fue publicada en el DOF el 2 de mayo de 2022 y es una reforma a la norma del año 1994. Esta norma contempla parámetros físicos, químicos, microbiológicos y radiactivos. Aunque el uso mayoritario del agua en la zona es de uso agrícola es claro que si el agua cumple con criterios para consumo humano lo hará también para uso agrícola. Las normas aplicables para uso de agua en la agricultura son las referidas al uso de agua tratada proveniente de descargas público - urbanas. Los parámetros que presentaron al menos una muestra con niveles que rebasaran a los indicados por la norma fueron la dureza (dos muestras), fluoruros (siete muestras), sólidos totales disueltos (tres muestras), sulfatos (dos muestras), arsénico (11 muestras) y hierro (dos muestras). Las muestras C85 y C86 ubicadas al Este de la ciudad de Fresnillo mostraron tener niveles elevados en 4 parámetros descritos (dureza, SDT, sulfatos y hierro). A continuación, se describen generalidades de los parámetros cuyos valores rebasaran al límite establecido por la norma.

Diagrama de Piper Acuífero de Calera (2004)

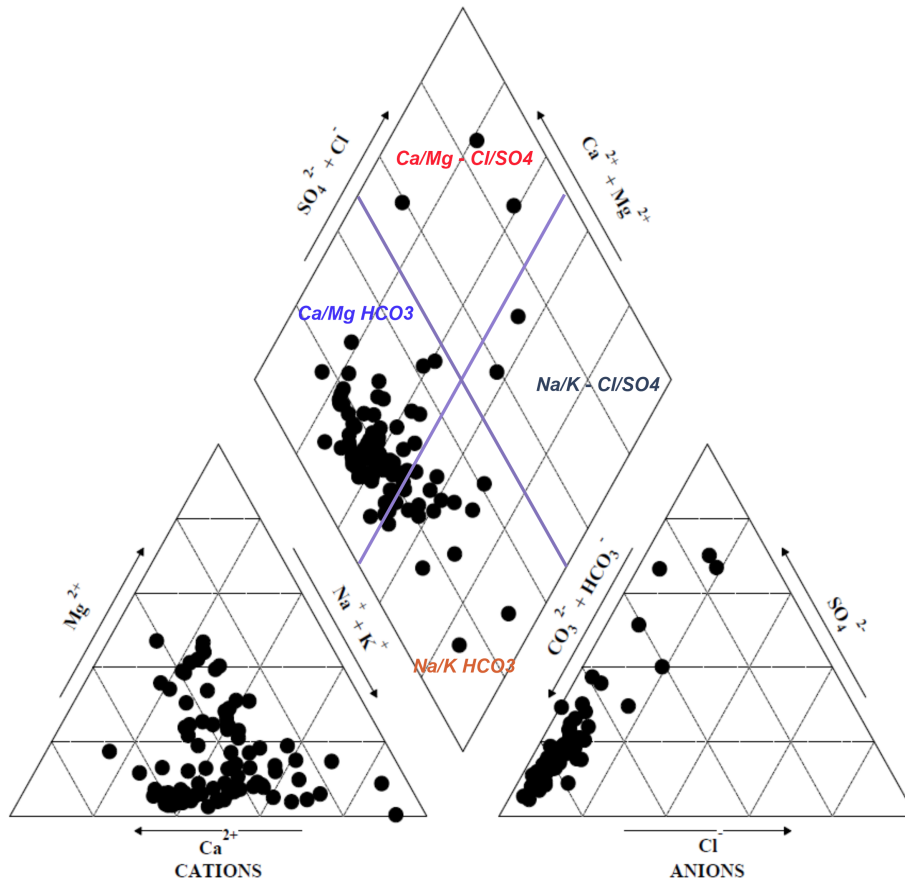


Figura 2.8: Diagrama de Piper de muestras de agua subterránea del acuífero de Calera. Elaborada con datos de Ariel Consultores (2004).

1. Fluoruros (F^-): El fluoruro está presente de forma natural en la corteza terrestre en forma de distintos minerales tales como la fluorita, criolita y fluorapatita y es común encontrar con concentraciones altas en aguas subterráneas (WHO, 2011). Las concentraciones altas de este parámetro son relacionadas con los sistemas regionales de flujo donde el agua ha tenido un periodo largo de interacción con minerales como la Fluorita (CaF_2) (Navarro y cols., 2017). El fluoruro es usado para el cuidado dental, se encuentra en pastas de todo tipo, sin embargo, una larga exposición a altas concentraciones (con límite máximo permisible en la norma mexicana y normas de la Organización Mundial de la Salud de 1.5 mg/L) puede causar dientes “amarillentos”. Navarro-Solís en 2017 encontró valores de F^- en un rango de 0.35 a 3.6 mg/L donde los valores más altos fueron localizados en la parte sur del acuífero en el acuífero de Benito Juárez. Para el año 2022 Rivera-Armendáriz encontró valores entre el rango de 0.1 a 0.8 mg/l que asoció a flujos locales; valores entre 0.8 a 1.5 mg/l que asoció a flujos intermedios y regionales a valores entre 1.5 a 5.7 mg/l (Armendariz, Banning, Benavides, Díaz, y Larragoitia, 2022). Rivera encontró valores más altos que los reportados por Navarro en 2017.

2. Dureza Total: En la NOM-127-SSA1-2021 la dureza total se le considera como carbonato de calcio ($CaCO_3$) y propone un valor máximo permisible de 500 mg/L. A pesar de no tener un riesgo evaluado para la salud, ciertas personas que han probado agua con concentraciones entre 100 - 200 mg/L la han rechazado. El principal problema surge en las redes de distribución donde por efectos de precipitación de este parámetro han causado taponamientos en las tuberías ya que se llega a incrustar en el material (WHO, 2011). La OMS recomienda la distribución de agua para consumo humano con valores menores a 100 mg/L.
3. Sólidos Disueltos Totales (*SDT*): Este parámetro revisa la cantidad de partículas orgánicas e inorgánicas suspendidas en una solución acuosa. Al igual que la dureza total, los sólidos disueltos totales no presentan un riesgo para la salud, sin embargo, si causan rechazo por parte de la población que la consume. En la NOM se establece como valor máximo de 1000 mg/L, mientras que la OMS recomienda que sea un valor menor a 600 mg/L para que estos sólidos no sean palpables por la población (WHO, 2011). Navarro (2017) encuentra valores entre 240 a 752.7 mg/L en el Aq Cal, debajo del límite establecido en México.
4. Sulfatos (SO_4^{-2}): La presencia de sulfatos en ambientes hídricos suele suceder por procesos naturales como su deposición atmosférica y por disolución u oxidación de minerales con sulfatos. O por procesos antropogénicos debido a la presencia de industrias como la minería de cobre, plantas eléctricas o refinerías metalúrgicas o de fosfatos (Miao, Brusseau, Carroll, Carreón-Díazconti, y Johnson, 2012). En concentraciones elevadas en el agua, el sulfato puede ocasionar problemas estomacales como diarrea (WHO, 2011) valores entre 250 mg/L de sulfato de sodio a 1000 mg/L de sulfato de calcio ocasiona rechazo al probarla. En el 2017, en la zona de estudio los valores analizados estuvieron dentro del rango de 2 a 102 mg/L de SO_4^{-2} . El límite máximo permisible en México es de 400 mg/L.
5. Arsénico (*As*): El arsénico es un elemento común sobre la corteza terrestre y su movilización en el agua puede ser de origen natural o antropogénico, es además un elemento altamente tóxico para el ser humano (Lillo, 2003). Puede estar presente en los estados de oxidación -3, 0, +3 y +5. En condiciones aeróbicas es común el arsenato (+5) y en condiciones anaerobias se presenta como arsenita (+3). Es común en aguas subterráneas donde existe presencia de depósitos de sulfuros minerales y depósitos de materiales granulares provenientes de rocas volcánicas (como es el caso del Aq Cal) (WHO, 2011). La presencia de arsénico en el agua subterránea por actividades humanas se asocia a la minería, sin embargo, una de las principales fuentes es la movilización natural debido a procesos geoquímicos como los procesos de oxidación (Lillo, 2003). El arsénico penta-valente y trivalente es el que mayor capacidad tiene de ser absorbido por el organismo. La OMS establece que el límite máximo contenido en una solución de agua debe ser de 0.01 mg/L, en cambio en la república mexicana este valor puede aumentar hasta 0.025 mg/L, es decir 2.5 veces lo recomendado a nivel internacional. Navarro-Solís (2017) localiza muestras de pozos de agua en la zona de estudio con valores entre 0.0033 a 0.075 mg/L asociando las concentraciones arriba de 0.01 mg/L a actividades mineras y a la extracción intensiva del agua que genera la movilización del As debido a la oxidación

del sulfuro en su forma de arsenopirita (AsFeS). El oxígeno entra al sistema debido al descenso del nivel estático y oxida al sulfuro liberando al arsénico (Navarro y cols., 2017). En el caso del estudio realizado por Rivera-Armendáriz (2022), la cantidad de arsénico varió de 0.05-10 mg/l en flujo local; 10-40 mg/l en flujos intermedios y de 40-75 mg/l en flujos regionales en pozos cuyas profundidades fueron mayores a 200 m (Armendariz y cols., 2022).

6. Hierro (Fe): Otro metal pesado al cual se le asocian riesgos a la salud humana cuando son ingeridos en altas concentraciones es el hierro. La ingesta de Fe es común en el día a día, se recomienda cierta cantidad dependiendo de la edad, sexo y aspectos biológicos de la persona, el consumo normal está dentro de los 10 a los 50 mg/L al día (WHO, 2011). La OMS no establece un riesgo asociado al consumo de hierro en el agua, pero por cuestiones de operabilidad y aceptabilidad del agua, se propone un límite de 0.2 mg/L. En México este valor asciende a 0.3 mg/L.

Las muestras con las mayores concentraciones tanto de As como de F se presentaron en las zonas topográficamente más altas. Se concentraron en el centro del valle la mayor cantidad de muestras con valores bajos con respecto a la NOM-127-SSA1-2021. Posiblemente las altas concentraciones de As se deben a la presencia de rocas volcánicas como las tobas ácidas y tobas riolíticas del Terciario. Rivera-Armendáriz (2022) caracterizó como fuentes potenciales del As a la presencia de rocas como granitos, riolitas y tobas riolíticas. Es fuerte la presencia de muestras entre 15 a 25 $\mu\text{g/L}$ en la parte centro norte del sitio. Las muestras más cercanas a la fm Zacatecas y la secuencia vulcanosedimentaria del Jurásico presentan valores bajos de As y F ya que es posible que sea agua que a interactuado poco con rocas volcánicas. En el caso de las concentraciones altas de F Rivera lo asoció a la presencia de fluorapatita encontrando a la fluorita subsaturada en la mayoría de las muestras analizadas, las condiciones de equilibrio en este mineral se asocian a las muestras de flujos regionales (Armendariz y cols., 2022).

2.1.7. Aspectos relevantes del uso del agua en el acuífero

Como parte final de este capítulo, es necesario remarcar los diferentes usos que tiene el agua que se extrae de este acuífero. Para ello se hizo uso de los datos obtenidos del REPDA en el periodo de 1994 a 2021, sin embargo, esto no quiere decir que anterior a estos registros no existía el uso del agua en la zona extraída por medio de pozos o norias.

Como se muestra en la figura 2.11, a partir del año 1995 hasta aproximadamente 2002, el número de concesiones otorgadas aumentó de 28.16 millones de metros cúbicos en 1995 a 135.2 millones en 2002, lo que significa un aumento promedio anual de 15.3 hm^3 siendo el año 1997 donde más permisos de extracción de agua se aprobaron.

También es importante conocer el tipo de uso del agua asignado a cada concesión. Según la CONAGUA en la región de estudio existen siete tipos de usos, el agrícola con un 70.85 % de volumen de agua concesionada, seguida por uso Público-urbano con 19.13 %, uso industrial con 8.13 %, diversos usos con 1.63 %, servicios 0.16 %, pecuario con 0.05 % y finalmente el uso doméstico con un porcentaje de 0.03 (Ver figura 2.12). El sector agrícola, así como en

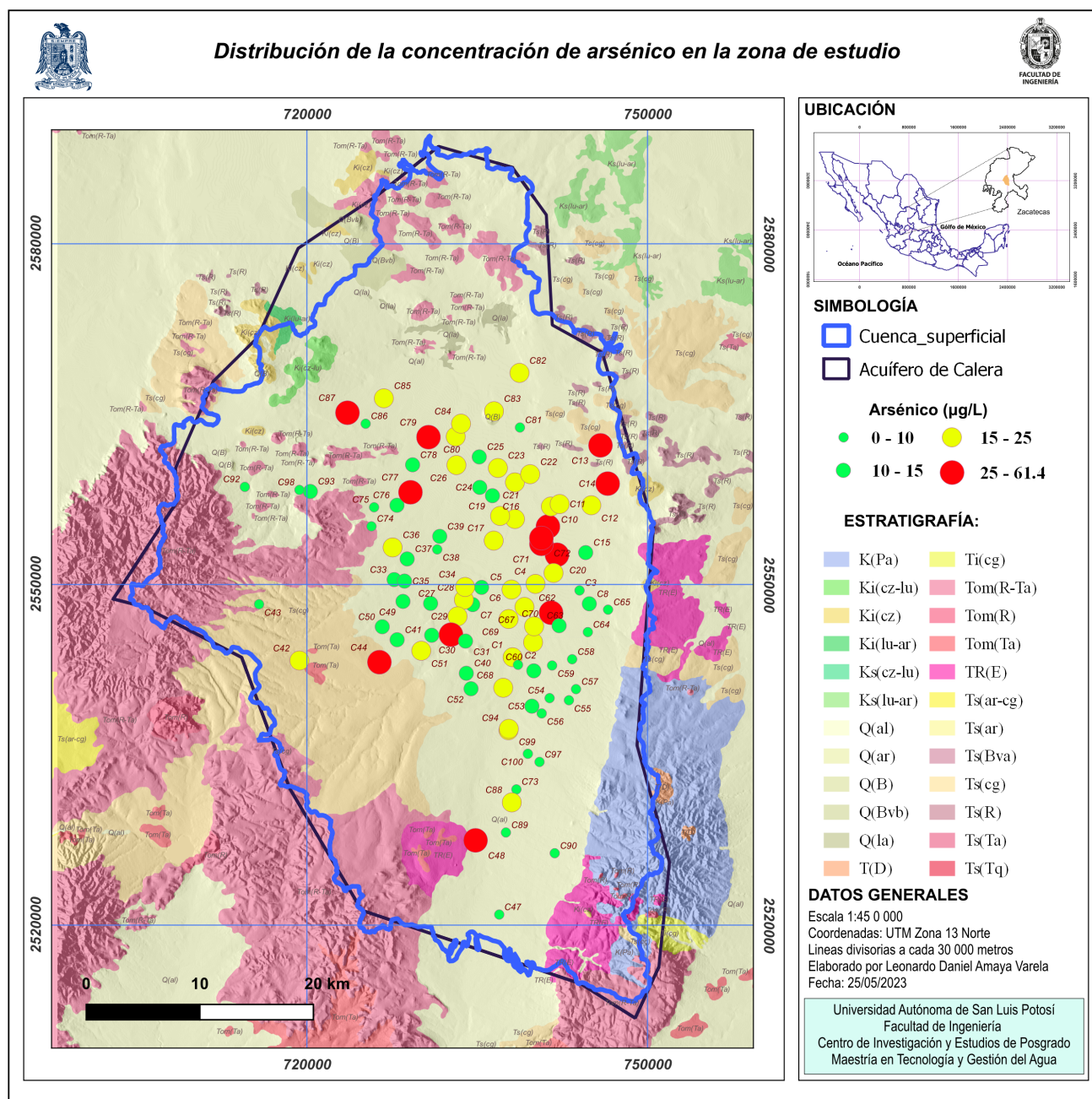


Figura 2.9: Concentraciones de Arsénico en $\mu\text{g/L}$ en la zona de estudio. Elaborada con datos obtenidos de Ariel Consultores (2004).

muchos otros casos representa el mayor consumidor de agua subterránea en regiones con bajas precipitaciones (Mojarro Dávila y cols., 2013).

El sector agrícola es de principal interés debido a la cantidad de agua concesionada. Por ello muchas de las acciones a favor de las condiciones hídricas del acuífero van encaminadas a este sector. En el capítulo tres del libro *Agua subterránea en Zacatecas* los autores valoran la producción y la productividad del agua en seis acuíferos de importancia estatal. Concluyen de forma general que para el 2006 el 46 % de la zona de cultivo contaba con mejoras en las

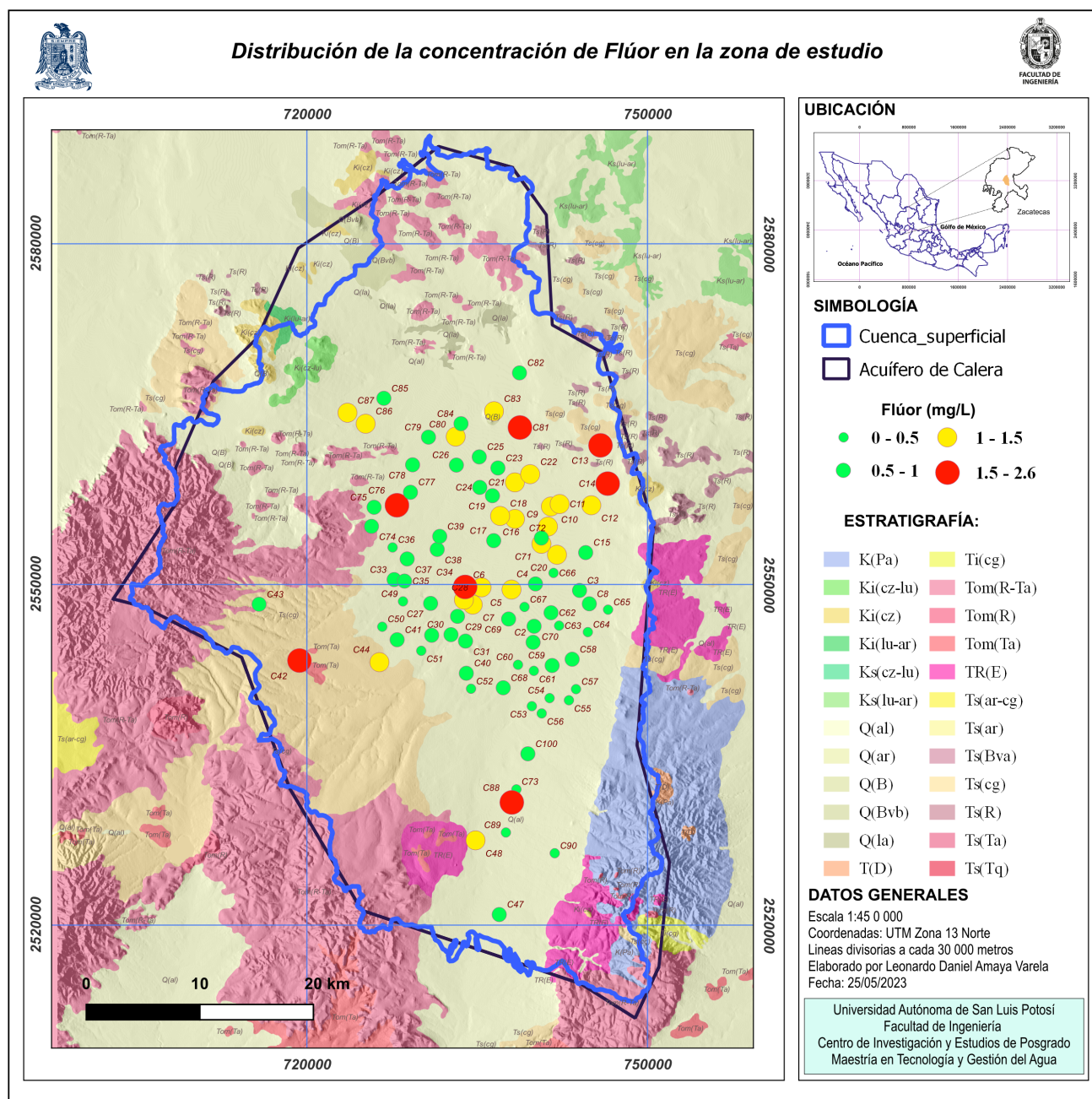


Figura 2.10: Concentraciones de Flúor en mg/L en la zona de estudio. Elaborada con datos obtenidos de Ariel Consultores (2004).

técnicas de riego, por ejemplo, en el riego de chile por medio de goteo se tiene una eficiencia de aplicación de más del 90 %, aclarando que este cultivo es el que más demanda agua en las zonas estudiadas en el libro citado (Mojarro Dávila y cols., 2013). Mojarro y los colaboradores (2013) proponen estrategias basadas en los costos de producción de cultivos de riego, la influencia de la sequía y el cambio climático, cambio de uso de suelo y la aplicación de técnicas como el cultivo de agua de lluvia y tecnificación del campo.

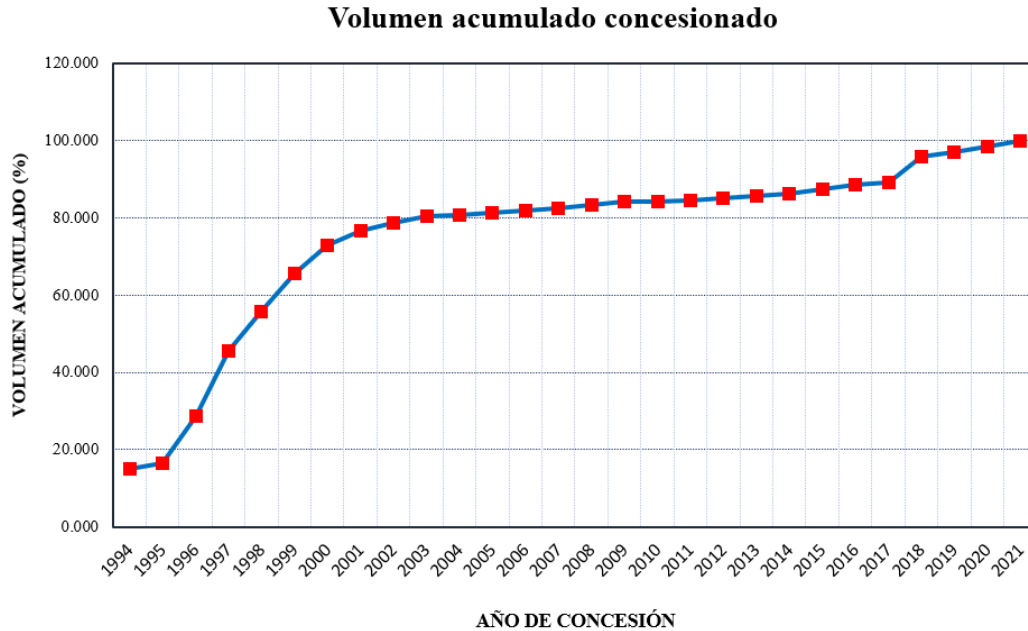


Figura 2.11: Evolución del volumen concesionado en el acuífero. Elaborada con datos de la CONAGUA (1994-2021).

En el sector público-urbano, el acuífero de Calera abastece a la población de las cabeceras municipales de Zacatecas, Morelos, Calera, General Enrique Estrada y Fresnillo. Su población representa el 29 % del total estatal según el INEGI (2022) y debido a la migración a poblaciones urbanas este valor puede aumentar en los próximos años.

2.2. Balances hidrológicos anuales

2.2.1. Tratamiento previo de datos climáticos

Las series de datos hidrológicos y climáticos suelen presentar inconsistencias debido a varios factores como el no registro de algunos de los parámetros, fallas en los equipos, falta de personal, etc. Por ello antes deben ser verificados para asegurar que la información obtenida tenga consistencia estadística. Para ello se llevó a cabo una serie de pruebas para desechar o mejorar las series de datos climáticos.

2.2.1.1. Estaciones climáticas

En México existe una red de estaciones climatológicas que son administradas por la CONAGUA y que comprende poco más de 5400 estaciones repartidas en toda la república mexicana de las cuales alrededor de sólo el 50 % están en funcionamiento. Estas estaciones generan datos de precipitación acumulado en 24 horas, temperaturas extremas, tormentas eléctricas, granizo, evaporación y algunas normales climáticas como la precipitación y temperatura medias. Para la obtención de los valores de precipitación anual y temperatura media

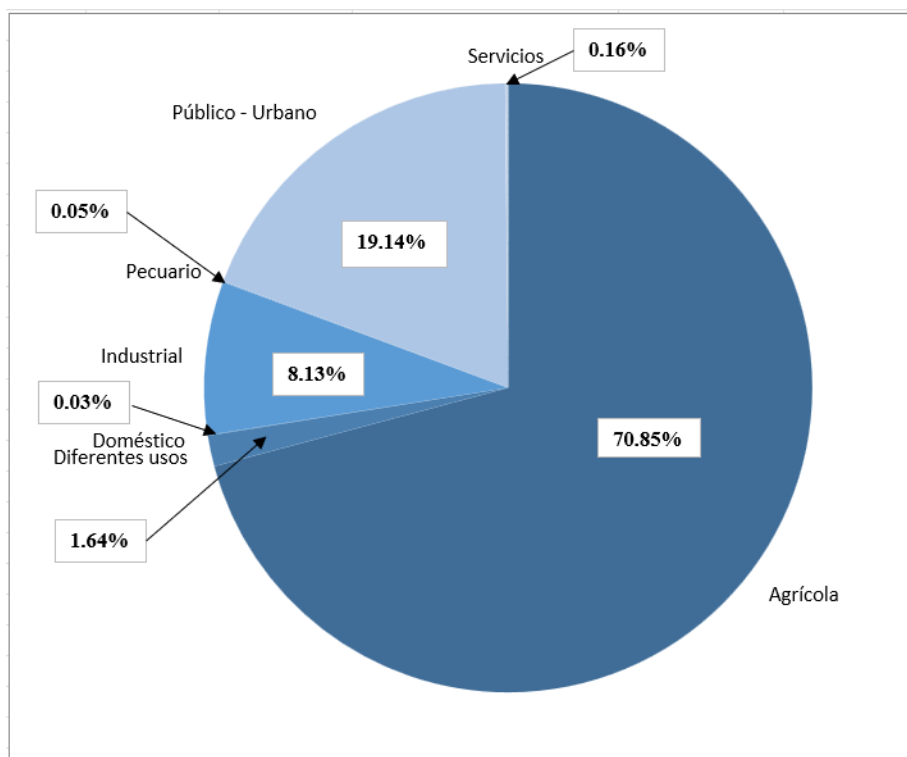


Figura 2.12: Porcentaje de volumen de agua concesionada según su uso. Elaborada con datos del REPDA (1994-2021).

anual en el sitio de estudio se tomaron los datos de lluvia general (la cantidad de lluvia recolectada en 24 horas dada en milímetros) y temperatura media general (la temperatura media de los registros recolectados en 24 horas dada en °C).

En la región donde se ubica el acuífero administrativo de Calera se tomaron en consideración 21 estaciones que estuvieron cercanas y que rodearan el polígono del acuífero. Estas estaciones fueron:

Estas 21 estaciones (Ver cuadro 2.2) fueron verificadas inicialmente para conocer si contaban con los registros suficientes para ser tomadas en cuenta (para el escenario programado de variabilidad climática se necesitan series de tiempo de al menos 30 años). Las estaciones que no cumplían con los requisitos fueron utilizadas para completar algunos datos faltantes en las estaciones elegidas (ver *Daltos faltantes*).

2.2.1.2. Análisis de homogeneidad e independencia

Para el análisis estadístico de las series de tiempo de datos hidrológicos y climáticos es necesario que esta serie sea homogénea (Naghetini, 2017) es decir, que todos los datos son una muestra que pertenece a la misma población y que se trata del mismo fenómeno observado bajo idénticas condiciones y que no son afectados por eventos no estacionarios (Naghetini, 2017). Este valor es determinado por el método de Helmert. Esta prueba consistió en verificar

Cuadro 2.2: Estaciones climatológicas inicialmente contempladas. Elaborada con datos de la CO-NAGUA.

Estación	Nombre	Estación	Nombre
32031	La Bufa	32154	Cerro de la Virgen
32044	Esc. Agronomía	32156	Morelos
32003	Calera	32174	Llano Blanco
32173	El Peñasco	32020	Fresnillo
32002	Boca del Tesoro	32137	Chichimequillas
32053	Santa Rosa	32099	Malpaso
32172	Guadalupe	32176	Sauceda de la Borda
32031	Rancho Grande	32005	C. Felipe Pescador
32047	Sn. A. Ciprés	32131	San Gerónimo
32026	Jerez	32018	El Sauz
32142	Tierra y Libertad		

los cambios de signo de los datos climáticos con respecto a su media. Se creó una secuencia (**S**) si una desviación con cierto signo es seguida de otra con el mismo signo, caso contrario cuando existió un cambio de signo una secuencia (**C**) fue creada (Campos-Aranda, 1984). Para considerar que la serie es homogénea, la diferencia entre los cambios (C) y las secuencias (S) deberá ser cero o estar dentro de un rango definido de error probable que depende de la cantidad de registros, esto es:

$$S - C = \pm\sqrt{n-1} \quad (2.1)$$

Si el número de secuencias S es mayor que el de secuencias C indica que existe una tendencia entre los datos o una variación en la media lo que puede ser ocasionada por el cambio de lugar de una estación pluviométrica. De igual modo cuando el valor de los cambios es mayor al de S, la homogeneidad no es establecida y las acciones que puede ocasionar esto no están del todo definido (Campos-Aranda, 1984).

La independencia sugiere que, en una serie de datos, un valor cualquiera no está afectado por su antecesor y no afecta al siguiente. La propiedad de la independencia se verifica mediante la persistencia que es cuantificada con el coeficiente de correlación serial de orden k para observar que tan fuertemente son afectados unos eventos por los anteriores (Campos-Aranda, 2010). El coeficiente de correlación serial de orden uno (1) fue usado en la cuantificación de series anuales utilizando la ecuación 2.2:

$$r_{xy} = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2.2)$$

El método de Anderson sugiere que cuando el valor obtenido de la ecuación 2.2 de orden 1 no excede los límites integrados por las curvas de control, no es estadísticamente diferente de cero lo que indica que la persistencia no existe (Campos-Aranda, 2010). El valor de los

límites está dado por la ecuación 2.3 y su signo corresponde al coeficiente de correlación serial de orden 1.

$$Lc = \frac{-1.00 \pm 1.964\sqrt{(n-2)}}{(n-1)} \quad (2.3)$$

Estos métodos fueron aplicados en las series de datos de lluvia total 24 horas de las estaciones climáticas mostradas en el cuadro 2.2. De las 21 estaciones cuatro no cumplieron el criterio de homogeneidad y cada una de ellas contó con datos independientes. Las estaciones que no mostraron datos homogéneos fueron *Llano Blanco (32174)*, *San Gerónimo (32131)*, *Boca del tesoro (32002)* y *Malpaso (32099)*. A partir de esto se buscó que las estaciones tuviesen la mayor cantidad de registros disponibles, principalmente, que tuviesen datos de precipitación total y temperatura media anuales entre los años 1980 a 2018 esto con el fin de cumplir con un criterio en el análisis de VC.

2.2.1.3. Datos faltantes

Muchas son las causas que generan la falta de registros climáticos en una estación, unas derivadas del equipo de medición como averías, otras por circunstancias humanas como la enfermedad del personal encargado de las mediciones o la falta o reemplazo de este (Campos-Aranda, 1984), cambios en la administración, conflictos armados, etc. Estos valores son estimados mediante métodos basados en la utilización de registros completos de estaciones cercanas o meses con valores medidos. Para esta investigación se utilizaron principalmente dos métodos, el primero propuesto por la *U.S. National Weather Service* y el segundo llamado *método racional deductivo*.

El método del servicio meteorológico nacional de Estados Unidos permite obtener el valor climático anual, mensual o diario faltante de las estaciones circundantes con el día, mes o año de registro faltante de la estación analizada. Este valor es afectado por un valor de ponderación determinado por la distancia lineal entre estas dos estaciones. Para la aplicabilidad de este método se espera que se tengan al menos dos estaciones circundantes (Campos-Aranda, 1984). Para la obtención del registro faltante se aplicó la ecuación 2.4.

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2.4)$$

Donde:

P_i = registro observado para la fecha faltante en las estaciones circundantes

$W_i = 1/D_i^2$ donde D es la distancia lineal entre la estación con el dato faltante y la estación auxiliar.

Este método fue utilizado cuando en la estación se tenía como máximo 3 años seguidos (es decir, este método se aplicó a años completos sin datos) con registros faltantes y las estaciones circundantes cumplieron con los valores necesarios.

El segundo método que se aplicó fue el método racional deductivo utilizado cuando no existen estaciones circundantes con el registro faltante y se hace uso de los datos de la

misma estación. Este método se restringe a registros con un máximo de dos años sin dato (Campos-Aranda, 1984). La metodología descrita fue tomada de Campos-Aranda (1984) y cabe mencionar que aplica también para la obtención de valores faltantes en series de temperatura media. En esta sección se mencionan datos de precipitación. El método indica que:

- Paso 1: Se realiza el promedio y suma de las precipitaciones mensuales de los años completos.
- Paso 2: Para todos los años completos se obtienen los porcentajes mensuales de precipitación los que serán igual a la lluvia mensual sobre el valor promedio calculado en el punto anterior, multiplicado por 100. Al sumar los porcentajes que se calculan deberá sumar 1200 y el promedio será 100.
- Paso 3: Los porcentajes mensuales que corresponden a cada uno de los doce meses, se suman y se dividen entre el número de años completos, es decir el porcentaje promedio (S_j).
- Paso 4: La hipótesis de la metodología se basa en que los datos de los meses que se desconocen tendrán un porcentaje igual a S_j . Se establece que:

$$\frac{P_i}{S_i} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{1200 - \sum_{i=1}^n S_i} \quad (2.5)$$

Por lo que el valor faltante fue proporcionado por:

$$P_i = \left(\frac{\sum_{i=1}^n P}{1200 - \sum_{i=1}^n S_i} \right) S_i \quad (2.6)$$

Donde:

- i = datos desconocidos (como máximo once).
- P_i = precipitación mensual desconocida de cada año con datos faltantes (valor en mm).
- $\sum S_i$ = suma de porcentajes promedios de los meses cuya precipitación se desconoce.
- $\sum P$ = suma de las precipitaciones mensuales desconocidas en años incompletos (mm)
- S_i = porcentaje promedio asignado a cada uno de los meses desconocidos o faltantes.

Los valores presentados en el cuadro 2.3 son los datos de la estación Calera cuyos valores en negritas fueron estimados con el método racional deductivo y el método de promedios.

2.2.2. Temperatura media anual

La obtención de la temperatura media anual y la precipitación media anual se realizó por medio del método de isoyetas. En esta sección se describe el método y los resultados adquiridos para la temperatura media anual.

Cuadro 2.3: Ejemplo de valores de precipitación total estimados en la estación Calera 32003. Elaborada con datos de la CONAGUA (1980-2018).

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	1.9	24.9	0.0	11.6	1.9	51.2	72.8	60.2	18.9	25.2	15.7	29.5
1981	44.4	3.2	5.1	21.9	34.8	122.1	71.2	72.5	103.7	44.7	3.2	1.65
1982	0.0	0.0	0.0	5.0	27.5	13.4	97.3	42.9	34.5	53.2	21.5	28.9
1983	0.0	0.0	0.0	0.0	56.1	29.9	67.9	92.6	75.4	44.7	3.2	1.6
1984	31.8	0.0	0.0	14.4	9.8	12.3	156.1	21.0	56.0	32.0	0.0	2.6
1985	10.5	5.2	0.0	21.1	13.5	114.6	101.9	72.5	34.5	72.5	0.0	21.6
1986	0.0	9.8	3.3	5.3	44.4	108.1	98.8	60.9	47.2	83.3	3.6	13.6
1987	72.6	38.2	1.8	3.6	42.3	65.0	76.2	72.5	239.5	5.4	3.5	10.3
1988	1.9	0.0	1.6	22.8	1.4	79.8	124.9	88.8	48.1	13.9	3.8	0.8
1989	4.3	1.5	0.0	0.0	15.2	6.2	48.6	182.8	22.4	8.7	34.8	19.5
1990	16.8	42.1	3.0	0.0	23.7	42.5	216.7	146.2	68.9	88.8	2.7	0.0
1991	1.4	16.9	0.0	0.0	0.0	30.7	247.3	72.4	119.0	7.9	1.2	22.6
1992	121.4	7.3	5.4	9.0	20.4	40.6	104.7	31.4	19.8	99.4	27	4.0
1993	20.8	0.6	0.0	0.0	8.0	58.6	68.5	68.1	108.0	29.3	15.5	0.0
1994	15.5	0.0	0.0	26.0	40.0	136.0	101.0	45.4	99.0	32.4	14.6	5.2
1995	2.9	0.0	0.0	0.0	3.0	51.1	97.7	113.1	58.8	0.0	6.5	1.0
1996	0.0	19.3	0.0	1.7	7.5	53.0	21.6	69.3	87.4	39.2	2.5	0.0
1997	40.1	14.2	14.7	9.1	8.3	59.6	20.0	21.5	26.2	18.1	8.3	2.4
1998	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.8	15.0	184.6	46.1	34.0	11.3	0.0
1999	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	85.2	90.9	15.0	49.6	5.5	0.0	2.1
2000	0.0	0.0	0.0	3.0	36.0	90.8	52.0	96.3	13.0	13.1	0.0	13.6
2001	0.7	0.0	3.9	14.7	18.6	66.0	42.0	91.3	67.7	5.4	2.7	4.0
2002	14.4	14.1	3.9	2.9	40.1	110.8	128.1	139.3	144.6	52.7	11.4	0.0
2003	2.9	8.2	0.0	0.7	29.2	32.5	160.6	103.1	92.6	54.1	1.0	0.0
2004	37.9	7.4	3.2	0.0	74.0	129.7	59.0	102.9	105.4	6.1	0.0	9.3
2005	2.4	59.8	2.3	0.0	4.1	0.0	81.6	73.9	45.1	34.3	1.0	3.0
2006	22.1	0.4	0.0	0.0	44.4	91.2	87.2	110.9	97.2	81.6	21.0	18.5
2007	11.2	13.6	0.0	2.5	3.8	118.0	203.8	38.0	62.2	10.3	5.6	0.0
2008	0.0	13.8	0.0	6.2	13.1	12.0	99.4	140.9	119.1	32.0	10.2	13.4
2009	9.2	6.1	4.0	2.4	11.2	60.8	16.8	49.9	41.3	16.3	60.8	8.4
2010	36.8	93.4	0.0	0.0	0.4	47.4	140.4	11.5	57.0	16.3	4.6	0.0
2011	0.0	0.2	0.0	0.0	1.5	13.0	50.0	50.0	109.4	23.2	8.6	0.0
2012	2.4	27.6	0.0	0.0	1.5	25.5	69.1	42.2	78.1	16.6	5.6	3.6
2013	33.8	0.0	0.0	0.0	2.2	58.6	137.1	33.2	64.6	55.3	23.0	85.6
2014	14.7	0.0	0.2	0.0	31.9	104.3	43.6	80.9	86.4	28.0	25.4	23
2015	12.7	37.2	99.5	15.1	34.6	308.5	92.5	41.8	119.2	64.2	11.4	11.2
2016	2.2	28.0	17	10.0	14.6	72.4	165.1	171.5	77.0	34.0	25.0	4.8
2017	0.0	0.0	23.6	2.4	4.4	54.2	112.8	88.1	102.1	5.6	18.0	18.4
2018	43.8	27.0	0.0	0.6	35.2	187.3	37.0	45.6	132.2	46.3	42.2	1.3

2.2.2.1. Método de isoyetas

En cuencas muy pequeñas suele suceder que pocas o ninguna estación queda dentro del área, por lo tanto, el uso de métodos gráficos como el de polígonos de Thiessen no es aplicable, en estos casos se recomienda el uso del método de isoyetas (Campos-Aranda, 1984). Este método consiste en generar curvas de igual cantidad de precipitación o temperatura para cada uno de los periodos descritos (1980 - 2018). El área restringida por estas curvas representa la región donde incide el valor climático estudiado. El registro promedio sobre el

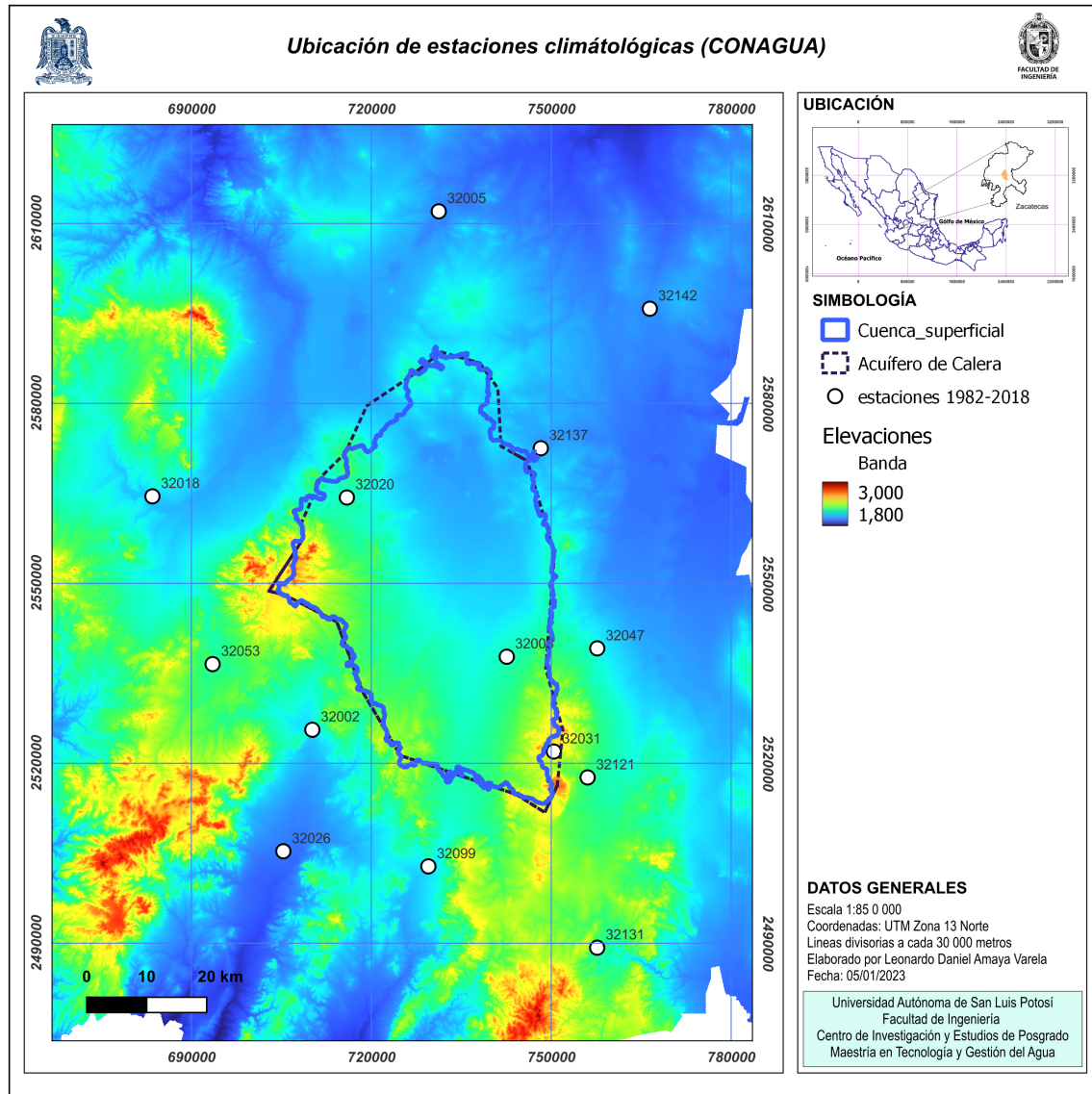


Figura 2.13: Estaciones climáticas utilizadas en el análisis de precipitación y temperatura. Elaborada con datos del INEGI (1980-2018).

área se obtiene ponderando el valor medio entre curvas sobre el área que encierran.

$$Tma = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i}{A_t} \right) T_i \quad (2.7)$$

Donde:

Tma = Temperatura media anual sobre el área

Ai = Área promedio entre curvas consecutivas

At = Área total de la cuenca

Ti = Promedio de temperaturas dadas por las curvas

La interpolación de los datos (para generar las curvas isoyetas) se hizo mediante el método

de kriging ordinario implementado en *Surfer 15*. El valor promedio anual de la temperatura es de **16.3 °C** teniendo como máximo valor promedio anual **18.98 °C** y mínimo **14.94 °C**.

Cuadro 2.4: Valores de temperatura media anual (TMA) en °C obtenidos por el método de isoyetas.

Año	TMA	Año	TMA
1980	15.98	2000	16.45
1981	16.20	2001	18.97
1982	17.57	2002	16.38
1983	16.66	2003	16.14
1984	16.80	2004	15.13
1985	16.66	2005	16.04
1986	16.10	2006	15.99
1987	14.93	2007	16.16
1988	15.78	2008	15.94
1989	16.20	2009	16.79
1990	16.01	2010	15.92
1991	15.83	2011	17.12
1992	15.00	2012	16.65
1993	16.09	2013	16.31
1994	16.48	2014	16.47
1995	16.22	2015	16.65
1996	16.11	2016	16.43
1997	15.74	2017	16.72
1998	16.55	2018	16.62
1999	16.06		

2.2.3. Precipitación

Al igual que el cálculo de la temperatura media anual, la estimación de la precipitación anual sobre la cuenca del Aq Cal se realizó por el método de isoyetas (ver subsección 2.2.2.1). Se utilizaron 13 estaciones climáticas distribuidas en la región que cumplieron con los criterios vistos en la subsección 2.2.1 (tratamiento previo de datos climáticos). Se aplicó la ecuación 2.7 a valores de precipitación total anual (lluvia acumulada 24 horas) obteniendo un valor promedio anual de las 13 estaciones de **445 mm** con un valor promedio máximo registrado de **1006.5 mm** (año 2015) y como mínimo **331.3 mm** (año 1999). Comparando los valores extremos de cada serie se puede notar que los datos de precipitación se alejan más de la media que los valores de temperatura teniendo valores de desviación estándar de 126 para lluvia acumulada y 0.49 para datos de temperatura. Los valores de temperatura y precipitación media son consistentes con lo encontrado por (Krienen, 2018); (Mojarro Dávila y cols., 2013) y (CONAGUA, 2020).

Cuadro 2.5: Valores de precipitación media anual (PMA) en mm obtenidos por el método de isoyetas.

Año	PMA	Año	PMA
1980	295.885	2000	334.055
1981	475.998	2001	317.602
1982	336.558	2002	558.072
1983	445.617	2003	529.573
1984	424.901	2004	575.932
1985	461.179	2005	343.571
1986	471.067	2006	549.496
1987	535.730	2007	451.476
1988	381.775	2008	531.278
1989	340.203	2009	365.032
1990	577.184	2010	370.493
1991	549.886	2011	233.972
1992	528.896	2012	267.837
1993	372.692	2013	652.043
1994	439.532	2014	446.734
1995	377.180	2015	781.441
1996	439.532	2016	476.437
1997	284.382	2017	418.958
1998	311.115	2018	666.494
1999	234.740		

2.2.4. Evapotranspiración

Otro parámetro importante es el cálculo de la evapotranspiración real (ETR). LA ETR es una medida de la cantidad de agua que sale del sistema hidrológico y suma la cantidad de agua que se evapora del suelo más la cantidad de agua de transpiración de la vegetación (Mijares, 2015). La ETR depende sólo de la precipitación y la temperatura, a diferencia de la evapotranspiración potencial que considera además el tipo de cultivo y la altura sobre el nivel del mar donde se toma la medida. Se tomaron en consideración dos fórmulas empíricas para el cálculo de la ETR que dependen tanto de la temperatura y la precipitación anual, el Método de Turc y el de Coutagne.

2.2.4.1. Método de Turc

La fórmula establecida por Turc se derivó de la observación del comportamiento de la ETR de 254 cuencas a nivel mundial (Campos-Aranda, 1984). Al igual que la fórmula de Coutagne, esta relaciona la temperatura media anual y la precipitación total anual. Esta relación da un valor aproximado resultante de las características de la cuenca (tamaño, topografía, zonas de insolación, etc.) que según la complejidad de esta hará que el valor sea menos o más parecido al valor real. La expresión con precipitación en mm y temperatura en °C dicta:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (2.8)$$

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

En el caso donde la precipitación sea menor a 0.31 veces L, la ETR sería mayor que la precipitación por lo tanto se opta por establecer que $ETR = P$.

2.2.4.2. Método de Coutagne

Coutagne propone dos ecuaciones para el cálculo de la ETR, una para latitudes comprendidas entre 30° y 60° y otra general (Campos-Aranda, 1984). Debido a que el Aq Cal se localiza por debajo del Trópico de Cáncer (latitud 23.5°) se describe la forma general del método:

$$ETR = P - \lambda P^2 \quad (2.9)$$

con λ igual a:

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14T} \quad (2.10)$$

La ecuación anterior toma en consideración los valores comprendidos entre $1/8\lambda$ y $1/2\lambda$. Cuando ETR es menor a $1/8\lambda$, ETR es igual a la precipitación y dicta que durante ese año prácticamente no se generó escurrimiento. Si es mayor a $1/2\lambda$, la ETR sólo depende de la temperatura y este parámetro está dado por la siguiente ecuación donde la temperatura T está dada en °C.

$$ETR = 0.200 + 0.035 T$$

Como se puede apreciar en la figura 2.14 debido a que los valores medios de temperatura no difieren mucho entre ellos (mínimo 14.93°C y el máximo de 18.97°C) el valor de la ETR depende especialmente de la precipitación, por ello los valores de ETR siguen la misma distribución que los datos de PMA. Es claro que el método de Turc generó valores más altos que el método de Coutagne ya que se observa que la función de este método siempre está por debajo del método de Turc a excepción de los años donde la precipitación fue igual a la ETR los cuales coinciden debido a valores bajos de lluvia media anual.

Para la construcción de este modelo numérico se optó por utilizar los valores arrojados por el método de Coutagne ya que sus valores no están sobre estimados y se ajusta mejor al balance general de agua. El cuadro 2.6 resume los valores de ETR para cada uno de los 39 años.

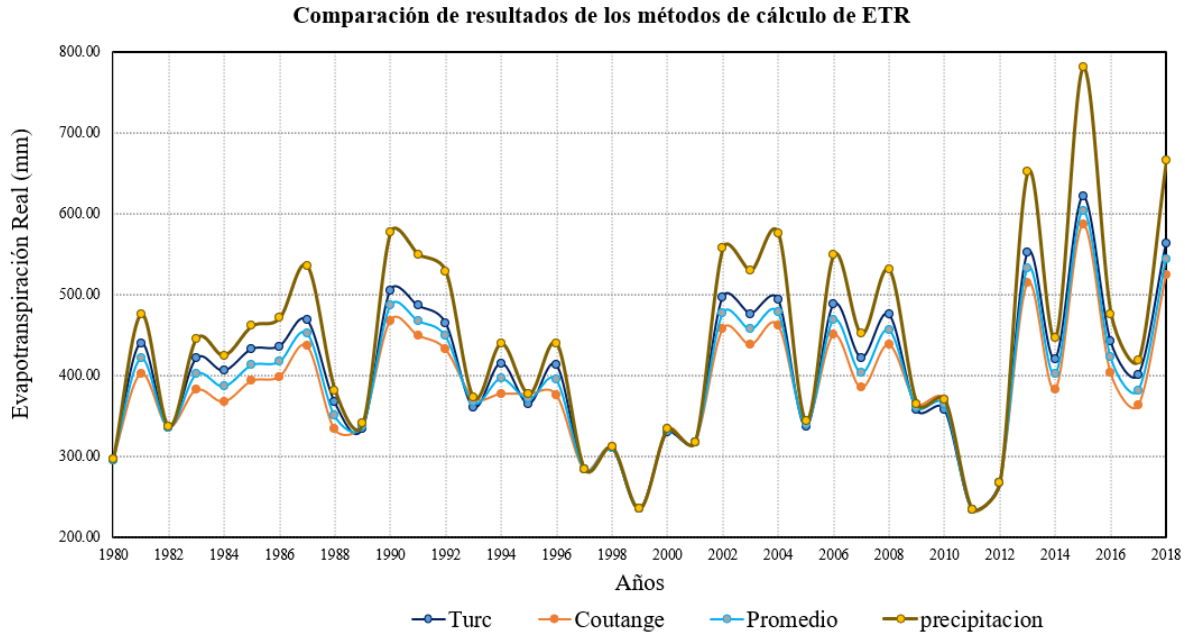


Figura 2.14: Gráfico comparativo entre la precipitación, la ETR (Turc) y la ETR (Coutagne) para los años establecidos. Elaboración propia con datos de la CONAGUA 1980-2018.

Cuadro 2.6: Valores de evapotranspiración real (ETR) en mm obtenidos por el método de Coutagne.

Año	ETR	Año	ETR	Año	ETR
1980	295.88	1993	372.69	2006	450.13
1981	402.17	1994	377.38	2007	384.92
1982	336.55	1995	377.18	2008	438.18
1983	382.24	1996	376.32	2009	365.03
1984	367.63	1997	284.38	2010	370.49
1985	393.28	1998	311.11	2011	233.97
1986	398.41	1999	234.74	2012	267.83
1987	436.46	2000	334.05	2013	514.16
1988	333.34	2001	317.6	2014	382.48
1989	340.2	2002	457.38	2015	586.4
1990	467.68	2003	437.91	2016	403.23
1991	449.65	2004	462.29	2017	363.09
1992	432.46	2005	343.57	2018	524.48

2.2.5. Escurrimiento

Otro de los parámetros importantes por definir es la cantidad de agua que escurre dentro del área de estudio. El escurrimiento se puede definir como la cantidad de agua de lluvia que circula sobre y debajo de la superficie y que finalmente se drena en los cauces fuera de la cuenca (en caso de cuencas exorreicas) o se acumula en un punto bajo de la región (cuencas endorreicas) (Mijares, 2015). El escurrimiento ocurre cuando durante la precipitación las pri-

meras capas de suelo se saturan debido a la infiltración, como la tasa de infiltración es menor que la de precipitación, el agua que no logra infiltrarse escurre y comienza a acumularse conforme el agua pasa de una cota topográfica mayor a una menor (Mijares, 2015).

Existen, como en cada parámetro, diversos métodos para el cálculo de la cantidad de escurrimiento en una zona, la NOM-011-CONAGUA-2015 toma en consideración el coeficiente de escurrimiento C que considera de forma simple el uso de suelo y la clasificación hidrológica del terreno. Otro método es el cálculo de la precipitación efectiva o precipitación en exceso (Pe) que toma en consideración el coeficiente "N" de escurrimiento que se calcula mediante la ponderación del grupo hidrológico (ver sección 2.1.5) y el área de influencia (Campos-Aranda, 2010).

El valor de Pe se define como la precipitación en exceso que llega a ser escurrimiento directo (Campos-Aranda, 2010). Para su estimación se hizo uso del método de Ven Te Chow quién definió la ecuación que relaciona la precipitación mínima para que exista escurrimiento y el valor N de la curva-escurrimiento:

$$Pe = \frac{(P - \frac{5080}{N} - 50.8)^2}{P + \frac{20320}{N} - 203.2} \quad (2.11)$$

Donde:

Pe = precipitación en exceso (mm)

N = valor de la curva escurrimiento (sin dimensiones)

P = precipitación media anual (mm).

Utilizando la carta de vegetación y uso de suelo (ver figura 2.7) (1:250000) del año 1992 y la carta de Edafología (ver figura 2.6) (1:250000) del año 2010 se calculó un valor de curva escurrimiento igual a 74 lo que indica una zona de buena respuesta hidrológica al escurrimiento esto debido en primera instancia a que gran parte de la zona del acuífero es zona de cultivo y en segunda, que los suelos con mayor presencia son los Phaeozem (grupo hidrológico C) y Luvisol (grupo hidrológico D). Los valores de escurrimiento son:

2.2.6. Infiltración

La infiltración es el mecanismo por el cual el agua que proviene de la precipitación se mueve a través y dentro del suelo debido a las fuerzas gravitacionales y de capilaridad (Bedient, Huber, Vieux, y cols., 2008). Es también denominado como "pérdida" que es la diferencia del agua que precipita y el agua que escurre (Mijares, 2015). La capacidad de infiltración de un suelo dependerá de la humedad que tenga este y de la intensidad de la lluvia, el tipo de vegetación y uso del suelo, la compactación de este y de la cantidad de aire atrapado. Medir este parámetro o calcularlo de forma directa es complicado por lo que se estableció su valor mediante el conocimiento de la ecuación general de balance:

$$Infiltración = Precipitación - Evapotranspiración - Escurrimiento \quad (2.12)$$

Debido a ser una zona de alto escurrimiento, se estableció que la evapotranspiración está implícita dentro del escurrimiento, esto es, de la precipitación el suelo se satura rápidamente

Cuadro 2.7: Valores de escurrimiento en mm para los años 1980-2018.

Año	Escurrecimiento	Año	Escurrecimiento	Año	Escurrecimiento
1980	285.44	1993	362.19	2006	538.93
1981	465.45	1994	429.00	2007	440.94
1982	326.08	1995	366.68	2008	520.72
1983	435.08	1996	429.00	2009	354.54
1984	414.38	1997	273.95	2010	359.99
1985	450.64	1998	300.66	2011	223.59
1986	460.52	1999	224.36	2012	257.42
1987	525.17	2000	323.58	2013	641.45
1989	329.72	2002	547.5	2015	770.83
1990	566.61	2003	519.01	2016	465.89
1991	539.32	2004	565.36	2017	408.44
1992	518.34	2005	333.09	2018	655.90

y escurre en los lomeríos y valles. El agua se acumula en las partes bajas de la cuenca y posteriormente se evapotranspira. Otro volumen de agua que es retenido por las plantas y suelos también se evapotranspira. La ecuación anterior quedó como:

$$\text{Infiltración} = \text{Precipitación} - \text{escurrecimiento}$$

Cuadro 2.8: Valores de infiltración en mm para los años 1980-2018.

Año	Infiltración	Año	Infiltración	Año	Infiltración
1980	0.00	1993	0.00	2006	9.51
1981	10.54	1994	10.53	2007	9.48
1982	0.00	1995	0.00	2008	9.51
1983	10.53	1996	10.53	2009	0.00
1984	10.52	1997	0.00	2010	0.00
1985	10.54	1998	0.00	2011	0.00
1986	10.54	1999	0.00	2012	0.00
1987	10.56	2000	0.00	2013	9.53
1988	10.50	2001	0.00	2014	9.48
1989	0.00	2002	9.51	2015	9.54
1990	10.57	2003	9.51	2016	9.49
1991	10.57	2004	9.51	2017	9.47
1992	10.56	2005	0.00	2018	9.53

Los valores en cero presentados en la tabla 2.8 corresponde a los años donde debido a los bajos valores de precipitación, la ETR fue igual a la precipitación por lo cual no existió infiltración.

2.2.7. Direcciones de flujo de agua subterránea

Las direcciones de flujo en la zona de estudio estarán determinadas por líneas de igual carga piezométrica obtenidas mediante la interpolación de mediciones de nivel estático por parte de la CONAGUA en los años 1997, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015 y 2017. Estos valores son los que posteriormente se utilizarán en la etapa de calibración y validación del modelo. Las elevaciones de terreno de los diferentes piezómetros fueron obtenidas de un modelo digital de elevaciones (o Continuo de elevaciones mexicanas CEM). El pozo llamado "Jesús López" se quitará del estudio debido a que posiblemente los altos valores piezométricos dados en ese punto se refieren a una condición local que no tiene relación con los demás pozos. Las líneas de misma carga hidráulica fueron interpoladas por el método de Kriging simple implementado en el programa *Surfer* en su versión 15.2.

El flujo en general ha mantenido una dirección preferencial de sur a norte cuyas salidas de agua tenían preferencia hacia la cuenca del acuífero administrativo de Benito Juárez y las lagunas de Santa Ana y El Sedano las cuales son definidas como zonas de descarga del acuífero.

2.2.8. Entradas horizontales de flujo de agua subterránea

Para cuantificar de alguna forma la entrada de flujos horizontales de otras cuencas se utilizó la relación establecida por Henry Darcy en 1856 (Tóth, 2009). Esta ecuación empírica semejante a la ley de Ohm se desarrolla a partir de una serie de experimentos que buscaban como objetivo el implementar filtros de arena en el tratamiento del agua. Esta relación conocida como Ley de Darcy, es una expresión matemática que enlaza los valores de carga hidráulica (h), la longitud de recorrido del agua (L), el área transversal por el que transita el agua (A) y una constante de proporcionalidad (K) que depende del medio donde circula y sus características hidráulicas para conocer el caudal de agua que viaja en esa sección (ver ecuaciones 2.13 y 2.14).

$$Q \approx -A \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (2.13)$$

$$Q = -KA \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (2.14)$$

Las entradas por flujo horizontal se calcularon proponiendo zonas con mayor nivel piezométrico aplicando las ecuaciones anteriores en los años con medición de nivel estático (1997, 2007, 2011, 2013, 2015 y 2017). Aquí se muestra el cálculo realizado para el año 2015 con espesores inferidos de material saturado.

Donde: E = Espesor saturado promedio (m).

K = Conductividad hidráulica (m/s).

b = Ancho de la celda (m).

Δh = Diferencia entre cotas piezométricas (m).

ΔL = Longitud entre cotas (m).

Q = Caudal que ingresa de forma horizontal (m^3/s).

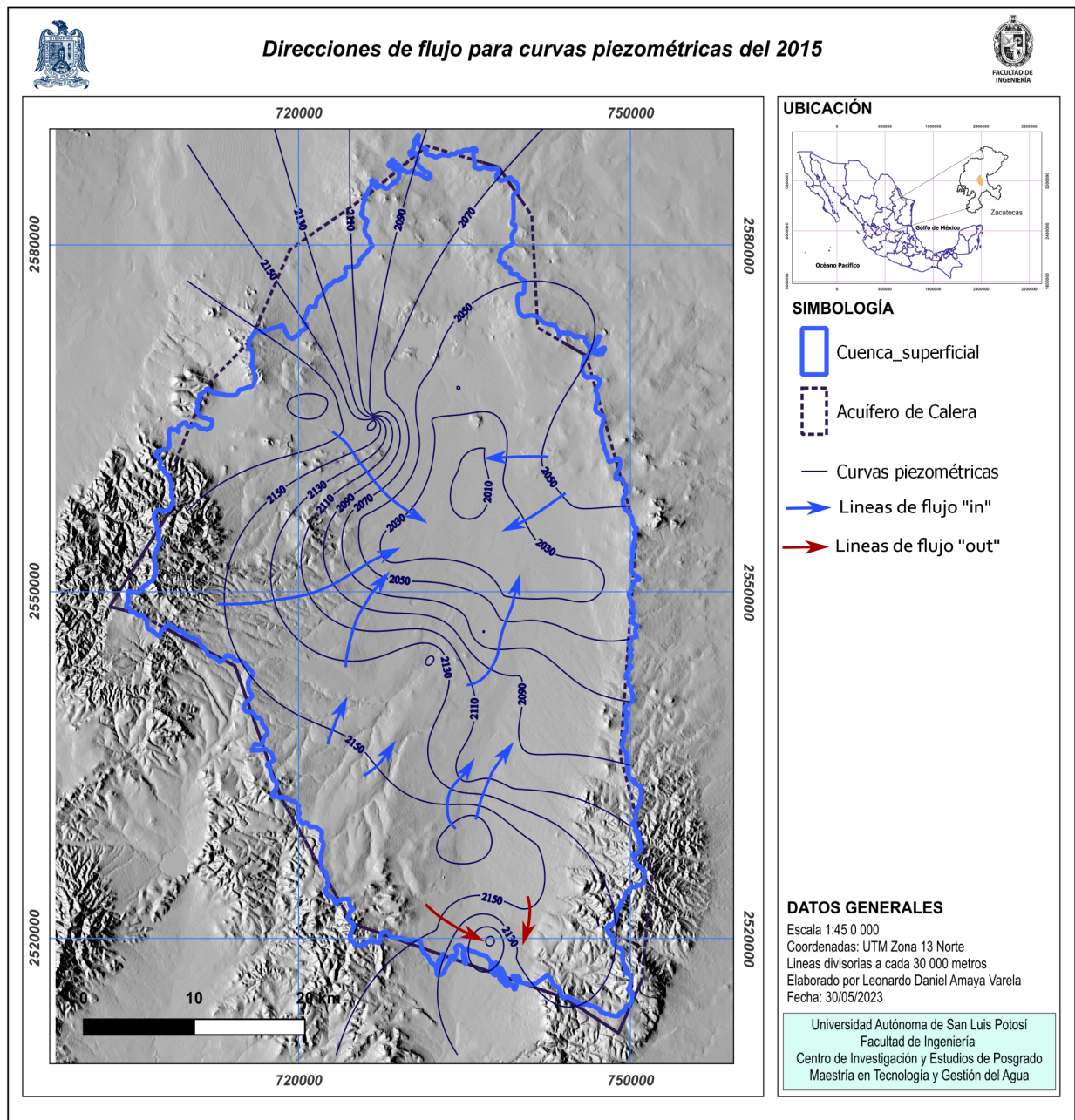


Figura 2.15: Direcciones de flujo y líneas piezométricas del año 2015.

Cuadro 2.9: Cálculo de entradas horizontales de agua subterránea aplicando la ley de Darcy para el año 2015.

Sección	K(m/s)	b(m)	E(m)	Δh (m)	ΔL (m)	Q(m ³ /s)	Q(Mm ³ /a)
C-1	1E-08	3901.14	250	10	623.51	0.000	0.005
C-2	7E-7	2781.51	220	10	1047.45	0.004	0.129
C-3	5E-5	4369.1	220	10	1219	0.394	12.433
C-4	5E-5	7480.33	230	10	3154.37	0.273	8.600
C-5	1E-5	7470.37	220	10	2807.76	0.061	1.930
C-6	1E-5	11812.1	220	10	3685.05	0.071	2.224
C-7	1E-5	10690.58	230	10	4740.07	0.052	1.636
C-8	1E-6	7051.94	240	10	4680.05	0.004	0.114
C-9	1E-5	6378.67	220	10	1870.52	0.075	2.366
C-10	7E-6	1084.36	200	10	643.52	0.024	0.744
C-11	7E-6	1430.36	210	10	1332.43	0.016	0.498
C-12	7E-6	3989.02	165	10	2468.98	0.019	0.588
C-13	7E-6	3691.93	165	10	2045.23	0.021	0.658
C-14	7E-6	3021.23	175	10	2049.47	0.018	0.569
						Suma	32.494

$$Q_{c1} = K_{c1} * (b * E)_{c1} * \frac{\Delta h}{\Delta L_{c1}} \quad (2.15)$$

...

$$Q_{cn} = K_{cn} * (b * E)_{cn} * \frac{\Delta h}{\Delta L_{cn}} \quad (2.16)$$

2.2.9. Extracción de agua mediante pozos de bombeo

Aunque lo ideal sería contabilizar los pozos y aforar los gastos que estos tienen para conocer de primera mano la cantidad exacta de agua que es extraída, esto es una tarea complicada cuando la cantidad de pozos de extracción es grande. Por ello el uso de datos de concesiones otorgadas por los organismos gubernamentales es un buen acercamiento. Como se vio al final del primer capítulo, se tomaron datos de volumen concesionado de los años 1994 a 2022. Los años con un aumento más significativo de volumen de agua permitido para extracción fue del año 1996 a 2002 pasando de un 17 % de extracción actual a 78 %. Es decir, pasó de un volumen de extracción de 25.58 millones de metros cúbicos en 1994 a 135.20 hm³/año.

Algunos pozos fueron reubicados debido a que las coordenadas no eran correctas o no coincidían con el registro del municipio al que pertenecían. Algunos pozos que no fueron reubicados pero que no entraban dentro de la zona de estudio son pozos que no se tomarán en cuenta en la implementación del modelo. La tabla 2.10 resume los valores de volúmenes concesionados en el periodo 1994 - 2021.

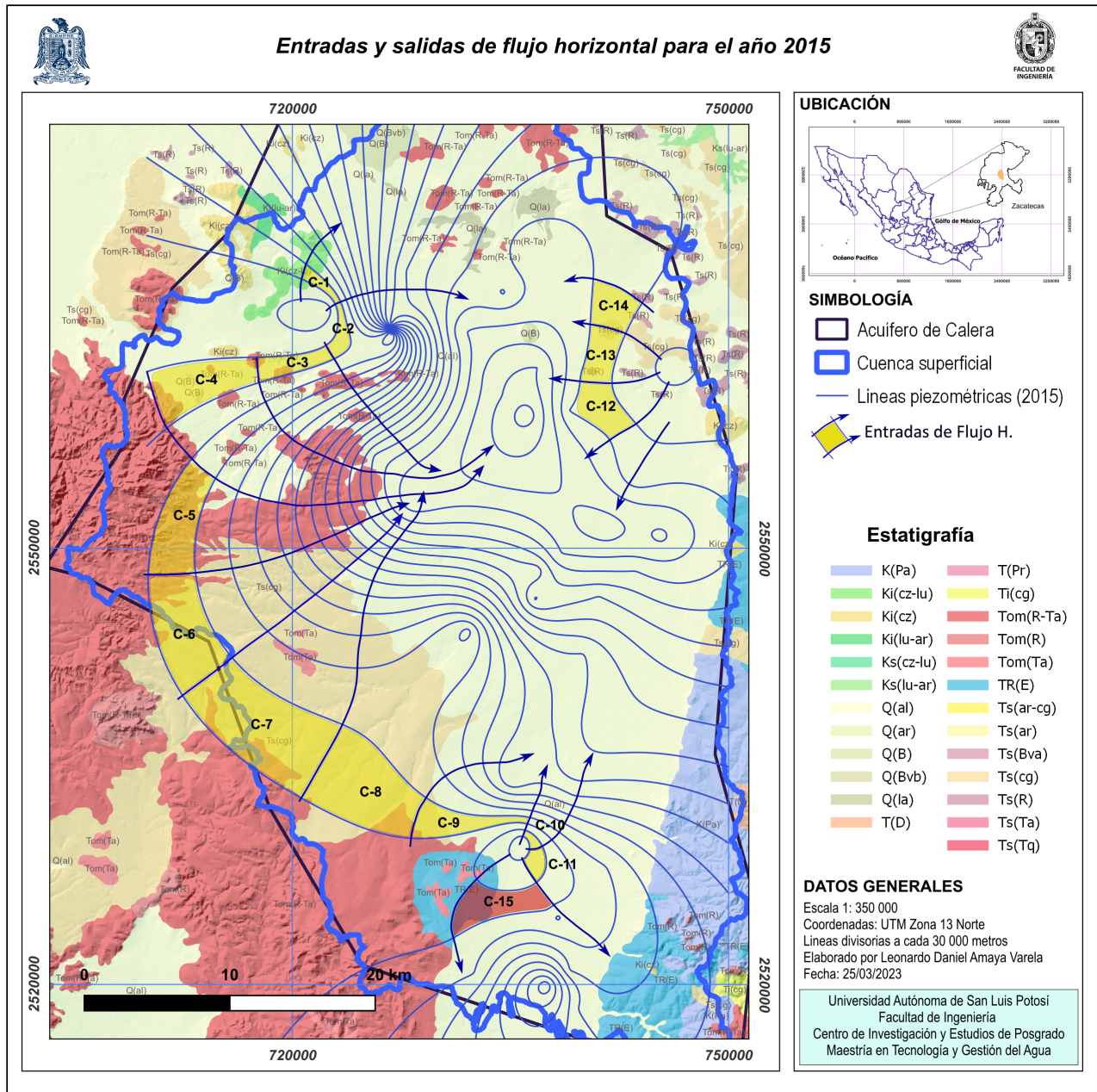


Figura 2.16: Celdas de entrada de flujo horizontal al acuífero mediante la ley de Darcy. Elaborada con datos de la CONAGUA 2015.

2.2.10. Recarga vertical natural e inducida de agua en el acuífero

Al final del capítulo 2 se hizo mención de la infiltración como un fenómeno que deriva de la lluvia y debido a fuerzas gravitacionales y de capilaridad esta agua penetra en el subsuelo y dependiendo de las condiciones del sitio, puede llegar a recargar al acuífero. La infiltración en los periodos de lluvia genera una de las principales fuentes de recarga de los acuíferos la cual se da a través los cauces donde estos pierden transmisión (Shanafield y Cook, 2014). El conocimiento de la recarga natural e inducida de agua en el acuífero no es

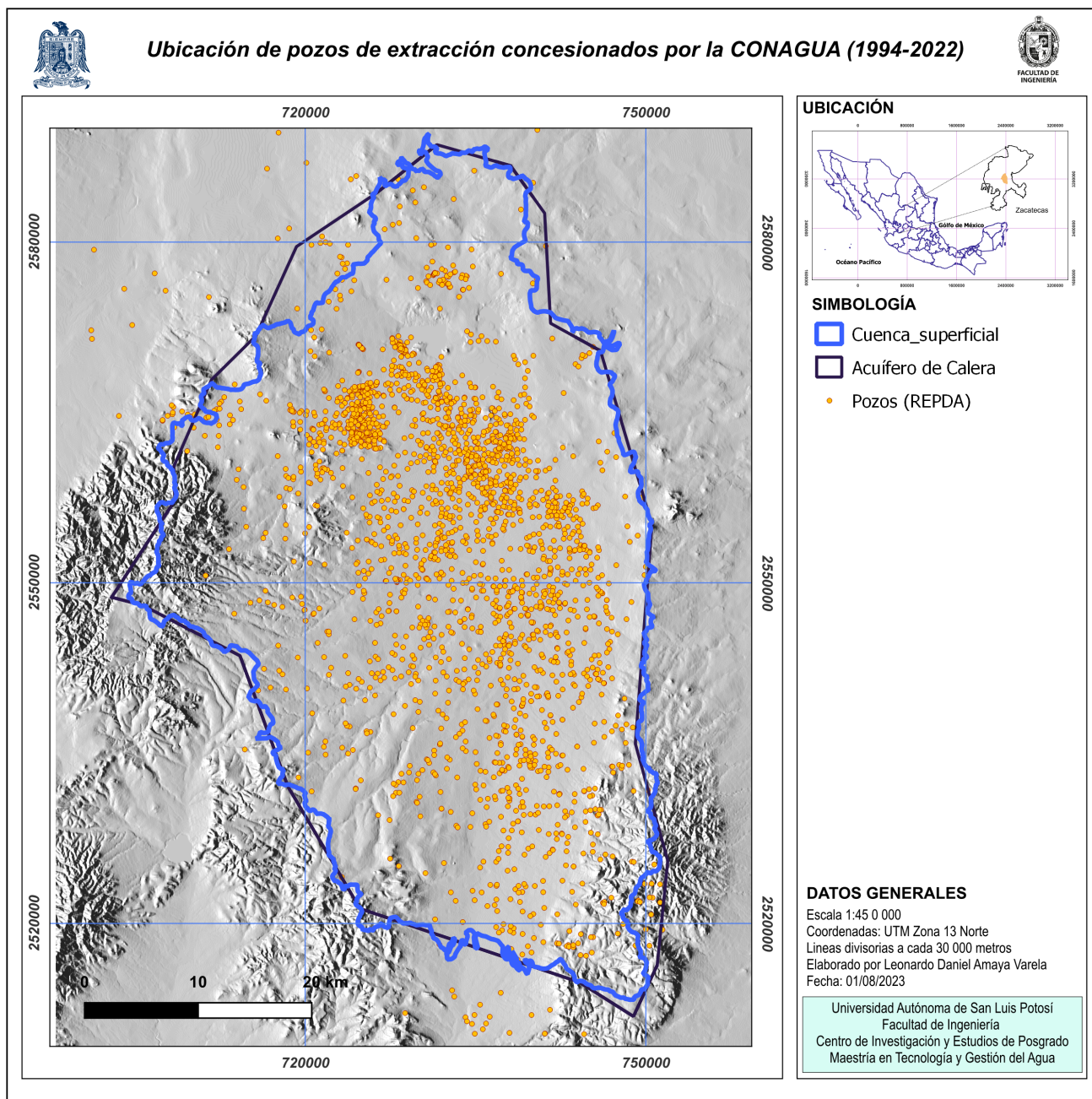


Figura 2.17: Pozos de extracción de agua en sus diversos usos. Elaboración propia con datos de la CONAGUA 1994-2021.

una tarea sencilla, para ello, Pacheco-Guerrero y cols. en 2017 integraron una metodología tanto hidráulica como hidrológica para poder determinar el valor de pérdida de transmisión a partir de la instrumentación de una cuenca hidrográfica en la región sur del Aq Cal. Implementando análisis fisicoquímicos y de isótopos encontraron que en cauces de al menos un kilómetro de longitud en zonas de recarga establecidas, existe una pérdida de transmisión del 15 % (Pacheco-Guerrero, 2020) la cual fue corroborada con datos de isótopos donde el agua analizada era de reciente infiltración.

Cuadro 2.10: Valores de volumen (Vol) y volumen acumulado (VA) de agua concesionada para cada año. Elaboración propia con dato del REPDA

Año	Vol(hm ³)	VA(hm ³)	Año	Vol(hm ³)	VA(hm ³)
1994	25.585	25.585	2008	1.186	142.849
1995	2.583	28.168	2009	1.615	144.464
1996	21.213	49.38	2010	0.27	144.734
1997	28.984	78.364	2011	0.221	144.955
1998	17.283	95.647	2012	0.991	145.946
1999	16.843	112.49	2013	1.181	147.127
2000	12.664	125.153	2014	0.762	147.889
2001	6.305	131.458	2015	2.34	150.229
2002	3.742	135.201	2016	1.891	152.119
2003	2.766	137.966	2017	1.106	153.225
2004	0.698	138.664	2018	11.331	164.556
2005	0.658	139.323	2019	1.957	166.513
2006	1.289	140.612	2020	2.611	169.124
2007	1.052	141.663	2021	2.444	171.568

Aunque la NOM-011-CONAGUA-2015 en su cuadro 1 del apartado 4.2.5. establece los porcentajes de retorno de los diferentes usos de agua, para el caso del Aq Cal son bastante inciertos los valores reales de recarga de agua al acuífero debido a la profundidad del nivel estático y a los valores altos de escurrimiento y ETR. Por ello para la estimación de la recarga se tomarán las siguientes consideraciones:

1. La CONAGUA en su estudio de disponibilidad para el acuífero administrativo de Calera establece un porcentaje de retorno de agua de uso agrícola del 5 %. Krienen (2018) indica que aún este valor genera incertidumbre acortándolo a 2.5 % del retorno agrícola. Este porcentaje de recarga lo extiende a las otras recargas inducidas como el uso público - urbano. Para este modelo se tomará inicialmente el 5 %.
2. Para la recarga proveniente de la precipitación se aplicará el 5 % de la infiltración en toda el área de estudio y para las zonas de recarga identificadas se establecerá en un inicio en 15 % del escurrimiento del agua de lluvia esto acorde con lo obtenido por Pacheco-Guerrero en 2017.
3. Las zonas potenciales de recarga se localizaron en las rocas volcánicas de la sierra que flanquea al Aq Cal hacia el Oeste. Las rocas que afloran tendrán asignados como valor de recarga un porcentaje mayor respecto a las rocas volcánicas que están debajo del conglomerado polimítico que se sobrepone.

El valor de la recarga vertical estará dado por:

$$Rv_T = Rv_u + Rv_a + Rv_{zr1} + Rv_p + Rv_{arr} \quad (2.17)$$

Donde:

Rv_T = Recarga vertical total.

Rv_a = Recarga por retorno agrícola.

Rv_u = Recarga vertical por retorno de agua de uso urbano.

Rv_{zr1} = Recarga vertical por infiltración de agua de escurrimientos en zonas de recarga.

Rv_p = Recarga vertical por infiltración de agua de lluvia.

Rv_{arr} = Recarga vertical en arroyos principales.

1. Rv_a : La recarga por retorno agrícola se centra en repartir el agua extraída para uso agrícola en la zonas con este uso de suelo. El área agrícola es de 1432.23 km^2 mientras que la extracción a marzo de 2022 fue de 121.503 hm^3 , al dividir el volumen de agua entre el área de cultivo genera una recarga de 84.83 mm/año . El 5 % de este valor es 4.24 mm/año . Sumando la recarga de la precipitación en zonas de cultivo la recarga $Rv_a = 4.74 \text{ mm/año}$.
2. Rv_u : La recarga inducida por retorno de agua de uso público-urbano se sustenta en el hecho de la existencia de fugas en las redes de distribución de agua potable. En México se pierde aproximadamente el 40 % del agua abastecida a la población en fugas de la red (Conagua, 2022). Una parte importante es atrapada en los primeros metros y es aprovechada por la vegetación existente, el resto recarga a los acuíferos. Tomando esto en consideración, las zonas urbanas que recargarán al Aq Cal son las poblaciones de Calera, Fresnillo, General Enrique Estrada y Morelos, la ciudad de Zacatecas quedará fuera debido a que se localiza en una zona de baja permeabilidad y donde la mayor cantidad de agua es descargada hacia la población de Guadalupe. Los resultados se muestran en la tabla 2.11.

Cuadro 2.11: Recarga inducida por uso público - urbano de agua en el periodo 1994-2022.

Poblado	Bombeo (m^3)	Area (m^2)	Recarga (mm/año)	2.50 %
Calera	4.30E+8	4.76E+6	90.39	2.26
Fresnillo	2.17E+6	1.39E+7	155.94	3.90
Gral. E. E.	2.93E+5	1.09E+6	268.46	0.239
Morelos	9.73E+5	1.24E+6	783.3	19.58
			prom=	8.11 mm/año

3. Rv_{zr} : Las zonas de recarga tienen que cumplir con ciertas características según la teoría de sistemas de flujo, es decir con zonas topográficamente altas, con fm rocosas con facilidad de infiltración, vegetación Xerófitas, nivel freático relativamente profundo, suelos Leptosol, Regosol, Cambisol y Luvisol. Vegetación como bosques de pino, pino-encino, pastizales naturales a más de 2300 m.s.n.m, etc. (Tóth, 2009); (Peñuela Arévalo y Carrillo Rivera, 2013). Con la metodología establecida por Peñuela-Arévalo (2013) se establecieron las zonas de recarga sobre todas las rocas volcánicas generando dos zonas, la de libre afloramiento y las rocas que están debajo del conglomerado Rv_{zr1} será el 20 % del escurrimiento neto promedio (es decir el promedio de escurrimientos ocurridos en los años donde la precipitación fue mayor a la ETR) en la zona y Rv_{zr2} el 15 % esto

conforme a las pérdidas de transmisión evaluadas. Rv_{zr1} será igual a **15.89 mm/año** y Rv_{zr2} a **12.578 mm/año** (se suma el retorno por riego sobre esta zona).

4. Rv_p : Para estimar este valor simplemente se consideró el 5 % de la infiltración, es decir $Rv_p = 0.5 \text{ mm/año}$ y fue aplicado en toda la cuenca superficial a excepción de la zona de afloramiento de la secuencia vulcanosedimentaria donde debido al tipo de rocas presentes no permite la infiltración.
5. Rv_{arr} : Este valor será igual a la recarga en la zona de rocas volcánicas pero sobre los arroyos principales. Es decir el valor será el 20 % del escurrimiento ($Rv_{arr} = Rv_{zr1}$).
6. Se deben considerar así mismo las zonas de no recarga en el acuífero las cuales son zonas que no aportan agua suficiente. Se identificaron 2 zonas principales, la primera es la Sierra que se conforma de rocas vulcanosedimentarias y la fm Zacatecas (ubicada al Este del acuífero) ya que debido a sus características hidráulicas no transmite agua suficiente al acuífero y la segunda es la zona de descarga ubicada en los suelos salinos cercanos a las lagunas de Santa Ana y el Sedano al norte de la zona de estudio.

2.2.11. Balance General del agua en el acuífero de Calera, Zacatecas

El principio de continuidad o de conservación de la materia establece que la cantidad de materia que entra a un sistema será igual a la cantidad de materia que salga. En los casos donde el volumen diferencial de control considerado se sumará el cambio de materia existente dentro del sistema. Así tenemos que:

$$\text{Entradas}(E) - \text{Salidas}(S) = \pm \Delta S \quad (2.18)$$

La ecuación anterior se puede extender al sistema acuífero como:

$$(R_{vT} + E_{fH}) - (S_{fH} + S_b + S_{Sa-Se}) = \pm \Delta S \quad (2.19)$$

Donde:

Entradas:

R_{vT} : Es la recarga total vista en el apartado anterior.

E_{fH} : Son las entradas por flujo horizontal.

Salidas:

S_{fH} : Son las salidas por flujo horizontal a otras cuencas.

S_b : Salida de agua debido a la extracción mediante bombeo.

S_{Sa-Se} : Zona de descarga en lagunas de Santa Ana (Sa) y el Sedano (Se).

Para efectos de entender mejor el funcionamiento del balance en el acuífero, se dividirá en balance superficial y balance subterráneo debido a la gran cantidad de información y que no se tienen igual cantidad de datos en todos los años. El balance superficial se resume en la tabla 2.12 donde los años con ETR igual o mayor a la PMA la infiltración no ocurre y la recarga por agua de lluvia tampoco.

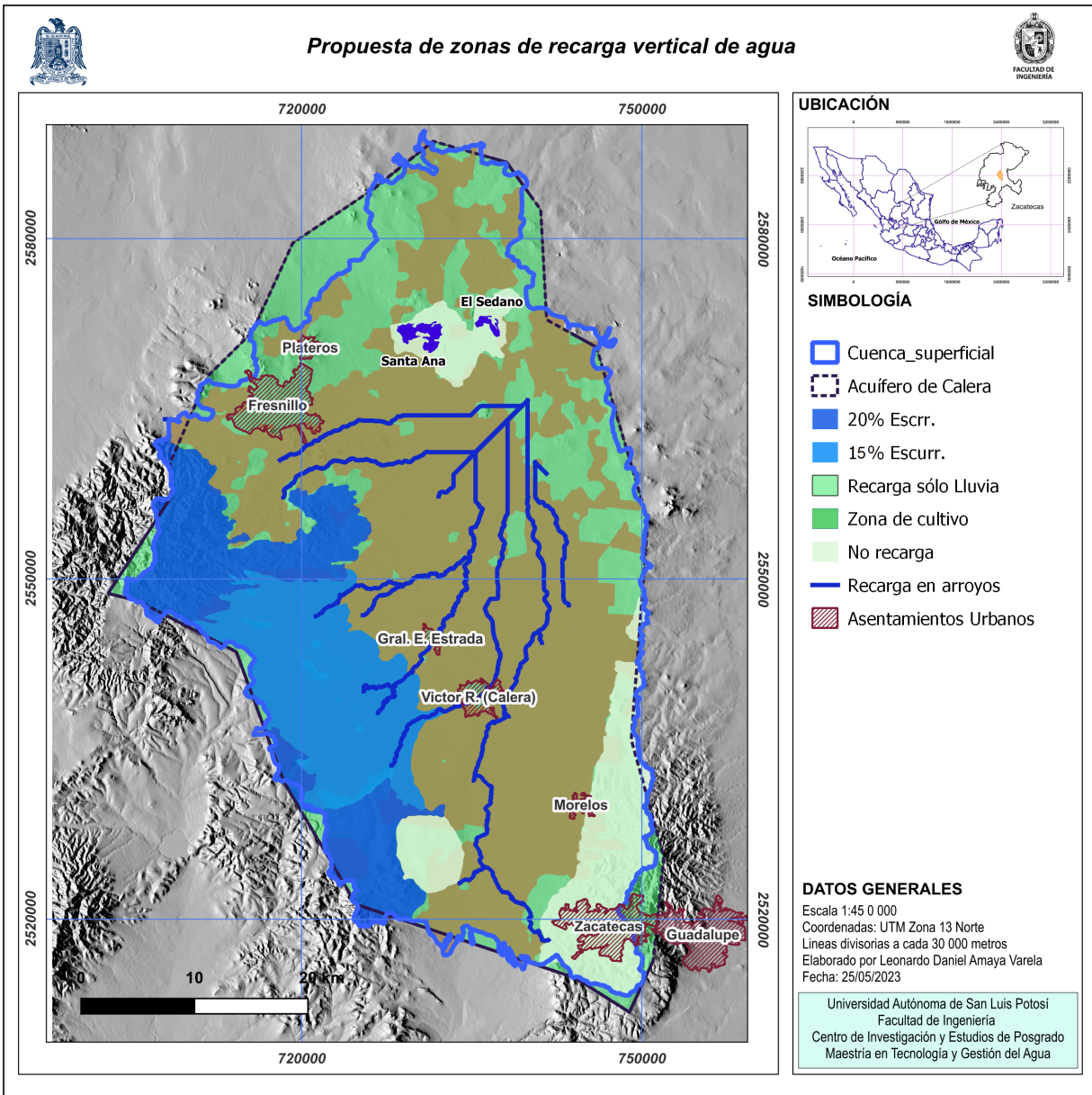


Figura 2.18: Zonificación de la recarga sobre el acuífero.

En el balance subterráneo se deben tomar en cuenta los años que tengan mediciones del nivel estático a fin de calcular los valores de entrada y salida de agua subterránea. Por lo anterior sólo se presentan resultados concernientes a los años 1997, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015 y 2017. Estos valores se presentan en la tabla 2.13 donde: B.A. es el bombeo agrícola; E.F.H. son las entradas de flujo horizontal; inf. es la infiltración; S.F.H. las salidas por flujo horizontal y E-S indica la diferencia entre las entradas (E) y las salidas (S). La figura 2.21 presenta de forma esquemática el balance para el año 2017 con valores en Mm^3 . Se consideran salidas de flujo horizontal aunque se considera lo indicado en el modelo conceptual elaborado en (Mojarro Dávila y cols., 2013) donde Júnez-Ferreira indicó que debido a los altos abatimientos la única salida de agua es mediante pozos de bombeo, sin embargo, las

Cuadro 2.12: Balance de agua superficial con valores en millones de metros cúbicos.

Año	PMA	ETR	Esc.	Inf	Año	PMA	ETR	Esc.	Inf
1980	666.53	666.53	642.99	0.00	2000	752.51	752.51	731.25	0.00
1981	1072.26	905.95	1048.51	23.75	2001	715.45	715.45	694.21	0.00
1982	758.15	758.15	734.55	0.00	2002	1257.14	1030.33	1235.72	21.41
1983	1003.82	861.07	980.09	23.73	2003	1192.94	986.48	1171.53	21.41
1984	957.15	828.16	933.45	23.70	2004	1297.37	1041.39	1275.94	21.43
1985	1038.88	885.95	1015.13	23.75	2005	773.95	773.95	752.68	0.00
1986	1061.15	897.5	1037.4	23.75	2006	1237.82	1013.99	1216.40	21.42
1987	1206.81	983.19	1183.02	23.79	2007	1017.02	867.09	995.65	21.37
1988	860.01	750.90	836.34	23.67	2008	1196.78	987.08	1175.37	21.41
1989	766.36	766.36	742.75	0.00	2009	822.29	822.29	801.00	0.00
1990	1300.19	1053.53	1276.38	23.81	2010	834.59	834.59	813.29	0.00
1991	1238.70	1012.91	1214.90	23.80	2011	527.06	527.06	505.98	0.00
1992	1191.42	974.19	1167.63	23.79	2012	603.34	603.34	582.19	0.00
1993	839.55	839.55	815.89	0.00	2013	1468.83	1158.23	1447.36	21.47
1994	990.11	850.11	966.39	23.72	2014	1006.34	861.61	984.97	21.37
1995	849.66	849.66	826	0.00	2015	1760.31	1320.97	1738.82	21.49
1996	990.11	847.73	966.39	23.72	2016	1073.25	908.34	1051.86	21.39
1997	640.61	640.61	617.1	0.00	2017	943.77	817.92	922.42	21.35
1998	700.83	700.83	677.27	0.00	2018	1501.38	1181.48	1479.91	21.47
1999	528.79	528.79	505.41	0.00	2019				

Cuadro 2.13: Balance de agua subterránea con valores en hm^3 .

Año	Bombeo	5 % Agrícola	E.F.H.	5 % Inf	S.F.H.	E-S
1997	68.28	2.08	26.39	0.00	1.065	-38.75
2007	130.41	5.04	32.74	1.06	1.5164	-90.05
2009	133.02	5.16	15.02	0.00	S.D.	-112.84
2011	133.51	5.18	30.06	0.00	2.1713	-96.10
2013	135.68	5.28	36.81	1.08	1.4692	-91.04
2015	138.78	5.42	32.49	1.08	1.0229	-98.77
2017	141.81	5.52	22.8	1.06	0.6469	-111.78

direcciones de flujo indican salidas de agua hacia el acuífero de Benito Juárez al sur de la zona de estudio.

2.3. Modelo SWAT como alternativa en el balance de agua superficial

SWAT son las siglas para *Soil and Water Assessment Tool* el cual es un modelo basado en sistemas de modelación pasados desarrollados por la *USDA Agricultural Research Service*

como SWRRB1 (1985), CREAMS2 (1980), GLEAMS3 (1987) y EPIC4 (1984) (Neitsch, Arnold, Kiniry, y Williams, 2005). Cada uno de estos modelos contribuyeron a ampliar la capacidad de SWAT en el manejo integral de cuencas hidrológicas. Desde que el sistema SWAT fue desarrollado se han creado distintas versiones, la primera fue SWAT98.1, seguido de SWAT99.2, SWAT2000, SWAT2005 y SWAT 2007 (Gassman, Reyes, Green, y Arnold, 2007).

2.3.1. Descripción del modelo basado en SWAT

Esta herramienta se define como un modelo físico de simulación el cual es determinístico y continuo que trabaja a nivel cuenca (Neitsch, Arnold, Kiniry, y Williams, 2011). Este modelo tiene como objetivo simular el impacto del manejo de suelos y agua, pesticidas y sedimentos y biomasa en cuencas grandes y con cierto grado de complejidad (Neitsch y cols., 2005). El sistema nos permite conocer las interacciones que juega el agua con su ambiente y para ello nos exige datos climáticos de temperatura y precipitación diarias, distribución de tipo y uso de suelo, vegetación y topografía (Neitsch y cols., 2005).

El modelo discretiza el espacio en subcuencas y a su vez estas las divide en unidades de respuesta hidrológica (HRU). Estas unidades conservan características similares de cada uno de los parámetros de entrada (Gassman y cols., 2007) como cobertura y uso de suelo. Dentro de cada una de las HRU se simulan procesos complejos generando balances hídricos en periodos de tiempo diarios, mensuales o anuales. A nivel subcuenca, el modelo logra simular escurrimiento y procesos de erosión, así como evapotranspiración y movimiento de biomasa (como el ciclo del carbono y transporte y degradación de bacterias), esto último lo consigue ya que el motor principal de SWAT es el movimiento del agua (Gassman y cols., 2007). Los parámetros que son de interés y se podrán comparar con el balance visto en la subsección anterior (*Balance general del agua en el acuífero de Calera, Zacatecas*) son la Precipitación, la ETR, el escurrimiento y la infiltración que dará juego a la recarga.

El acoplamiento de un modelo de agua superficial y agua subterránea ha tenido especial interés a partir de 1999 (Y. Wang y Chen, 2021). El acoplamiento del modelo SWAT y MODFLOW dio lugar a tres estudios base para su combinación; el primero Sophocleous et al. (1999); seguido de Kim et al. (2008) y el más reciente de Bailey (2016) (Y. Wang y Chen, 2021). El estudio paralelo de ambos modelos ha sido replicado en muchas regiones del mundo, en especial Estados Unidos de América; Irán, países asiáticos como Corea del Sur y China y países europeos (Y. Wang y Chen, 2021). En México sólo se tiene una investigación registrada según la investigación de Wang y Chen (2021). La interacción entre estos dos modelos fue impulsada por Sophocleous et al. (1999) mejorada por Kim et al. (2008) que crearon SWAT-MODFLOW. La forma más común de interacción de los modelos fue desarrollada por Bailey (2016) el cual integró una interfaz más amigable para hacer esta interacción.

A continuación se describen los parámetros más importantes para el modelado de flujo, dejando fuera los parámetros bioquímicos.

- Precipitación (*PRECIPmm*): Cuando no se tienen datos diarios de precipitación, SWAT

estima y completa los datos diarios desde valores mensuales mediante un modelo basado en cadenas de Markov de primer orden donde se define si el día es húmedo o seco a partir de una distribución de probabilidades que se genera a partir de los datos mensuales introducidos (Neitsch y cols., 2005). En el caso donde el usuario conozca los valores diarios de precipitación estos se introducirán a partir del cálculo de la precipitación media. En el caso de este modelo se utilizó el método de polígonos de Thiessen. Los valores de precipitación diaria se utilizan para calcular la lluvia máxima de media hora necesaria para conocer las escorrentías máximas en la cuenca (Neitsch y cols., 2005).

- **Evapotranspiración real (ET_{mm}):** Dentro del modelo SWAT define a la evapotranspiración como un proceso donde cierta cantidad de agua líquida que está en la superficie se convierte en vapor atmosférico (Neitsch y cols., 2005), esto incluye el agua de los ríos, lagos, suelos descubiertos, vegetación y en caso de formularse nieve, sublimación. SWAT calcula de forma independiente la evaporación del agua de los suelos y la transpiración de la vegetación, por ejemplo, la evaporación es una función del contenido de humedad y profundidad del suelo. La ETR es calculada a partir de la evapotranspiración potencial (ETP) cuyo cálculo se obtiene aplicando los métodos de *Penman-Monteith* (1965), *Priestley-Taylor* (1972) y el método *Hatgreaves* de 1985 (Neitsch y cols., 2005), en el caso donde el usuario prefiera introducir valores diarios de ETP para utilizar algún método diferente. Para que el programa pueda calcular la ETR, SWAT calcula la cantidad máxima de evaporación y transpiración una vez haya eliminado la cantidad de agua de lluvia retenida por el dosel de las plantas.
- **Escurrimiento ($SURQ\ GEN_{mm}$):** El volumen de escorrentía es determinado por el mismo método de número de curva-escurrimiento obteniendo la lluvia en exceso (mm de agua) (Neitsch y cols., 2011). Este método se describe de forma más específica en el subcapítulo **Escurrimiento**.
- **infiltración ($PERC_{mm}$):** SWAT tiene una componente que calcula la infiltración y a define como la entrada de agua al perfil de suelo desde la superficie (Neitsch y cols., 2005). Esta se establece a partir de una tasa de infiltración que se deriva del conocimiento de la humedad inicial del suelo, esta infiltración es similar a la conductividad hidráulica del suelo saturado. Su cálculo indirecto depende del escurrimiento y esta cantidad de agua que entra al perfil del suelo. SWAT propone el cálculo de la infiltración tomando en cuenta el método de Green y Ampt que simula directamente la infiltración.

2.3.2. Balance hídrico anual

Se ha desarrollado un balance hídrico anual en el Aq Cal realizado mediante el modelo SWAT, elaborado por el Dr. Carlos Alfonso Muñoz Robles y sus colaboradores en el Instituto de Investigaciones en Zonas Desérticas de la UASLP. Este modelo contempló los datos de precipitación y temperatura diarias de cuatro estaciones automáticas administradas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) que tienen datos de 2011 a 2021. Además de capas de tipo y uso de suelo, un modelo digital de elevaciones con una refinación de 15X15 metros.

El modelo determinístico resuelve la ecuación de balance implementada en dos fases en cada una de las distintas HRU. La primera fase es la que controla la cantidad de agua y sedimentos y la segunda el movimiento del agua y la biomasa dentro de la cuenca. La ecuación de balance en la primera fase se describe como:

$$Sw_t = Sw_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{suf} - Ea - W_{seep} - Q_{qw}) \quad (2.20)$$

Donde Sw_t es el contenido de agua final en el suelo (mm), Sw_0 es el contenido de agua en el suelo (mm); R_{day} es la cantidad de lluvia en el día i (mm); Q_{suf} la cantidad de escurrimiento (mm) en el día i ; Ea la evapotranspiración el día i , W_{seep} agua infiltrada (mm) en la superficie del suelo en el día i y finalmente Q_{qw} es la cantidad de agua de retorno (mm) (Sisay, Nedaw, Birhanu, y Gigar, 2023).

El modelo SWAT requiere mínimo tres años de datos climáticos como forma de ajustarse (también llamado calentamiento), por lo tanto, los años con estimación de balance se reduce a los años 2014 a 2021 (con los años 2011, 2012 y 2013 como ajuste del modelo). Los balances estimados se hicieron anuales debido a que VMF requiere principalmente datos de recarga anuales, sin embargo, se puede modificar para que los resultados sean mensuales o diarios. El valor de cada uno de los parámetros involucrados en el modelo SWAT se presentan en la figura 2.19.

Del balance anual (figura 2.19) hay que aclarar lo siguiente:

Los procesos que juega el agua una vez que ha infiltrado en la zona de raíces se divide en tres zonas principales. La primera que es la zona de raíces donde el agua contenida puede salir nuevamente a la superficie como flujo lateral. La segunda, el acuífero libre o acuífero superficial. Esta zona se toma como acuífero libre no tanto por las propiedades geológicas sino por ser el agua de la zona saturada que está más somera dentro del sistema, el agua en este lugar puede retornar a los cauces como flujo base o evapotranspiración. La zona más profunda es el acuífero confinado, denominado así ya que cuando el agua es ingresada a este lugar ya to tiene juego con el agua superficial y la única forma de salida es como flujo a otras cuencas. Los valores mostrados son resultado del promedio de los resultados en las simulaciones de los años de 2014 a 2022, sin embargo, el último año no debe ser considerado ya que por falta de información los valores en cada uno de los parámetros es cero. En la figura 2.20 se muestra la distribución espacial de los parámetros analizados.

Haciendo una comparación de valores medios entre el balance anual de agua y el balance obtenido mediante la simulación SWAT podemos observar que la precipitación media anual se corresponde en más del 90 % en casi todos los años (excepto el 2015 con 83 % de correspondencia) lo que indica que tanto el método de Polígonos de Thiessen y el método de isoyetas dan resultados muy similares ya sea tomando datos diarios o mensuales. En los datos de ETR los valores se corresponden en promedio en un 77 %. El escurrimiento presenta diferencias promedio del 78 % teniendo el año 2016 con mayor correspondencia entre los datos (98 %). Finalmente, la infiltración se emparetó con la percolación donde la diferencia es abismal del orden del 700 %. Sin embargo, si tomamos en consideración que según el balance anual marcado en la figura 2.19 aproximadamente el 81 % del agua percolada retorna como

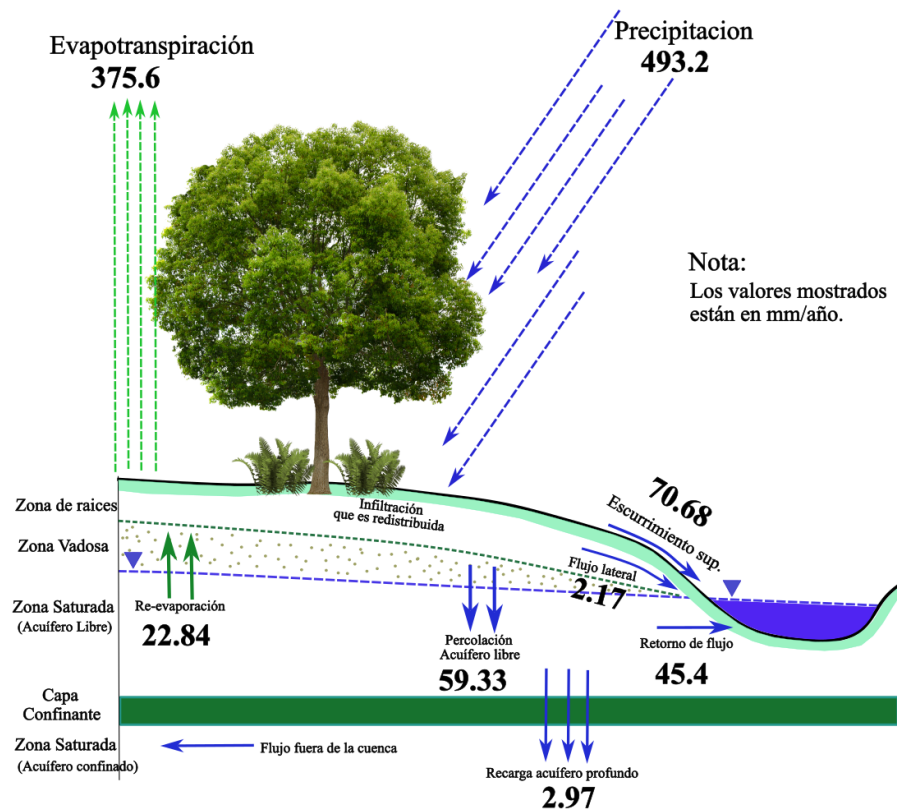


Figura 2.19: Resultados de la simulación anual del modelo SWAT de la cuenca superficial del acuífero de Calera.

flujo base dentro de la cuenca o fuera de ella, por lo tanto la infiltración neta con posibilidad de recargar es el 18.47 % del agua percolada. Esto reduce el error a una diferencia del 129 %. Los cuadros 2.14 y 2.15 resumen lo indicado donde B.A. = Resultado del Balance Anual del año correspondiente, B.SWAT = Resultado del Balance implementado en SWAT.

Cuadro 2.14: Comparación de resultados de balance anual y balance simulado mediante SWAT (valores en mm/año).

Parámetro	B.A. (2014)	B.SWAT(2014)	SWAT/BA	B.A. (2015)	B.SWAT(2015)	SWAT/BA
Precipitación	446.73	419.32	0.94	781.44	649.22	0.83
ETR	382.49	332.33	0.87	586.41	393.93	0.67
Escorrentamiento	54.76	76.4	1.4	185.49	131.93	0.71
Infiltración	9.48	44.23	4.67	9.54	86.72	9.09
Parámetro	B.A. (2016)	B.SWAT(2016)	*	B.A. (2017)	B.SWAT(2017)	*
Precipitación	476.44	442.66	0.93	418.96	411.41	0.98
ETR	403.23	338.3	0.84	363.09	282.68	0.78
Escorrentamiento	63.71	62.4	0.98	46.39	56.45	1.22
Infiltración	9.5	40.95	4.31	9.48	56.47	5.96
Parámetro	B.A. (2018)	B.SWAT(2018)	*	B.A. (2019)	B.SWAT(2019)	*
Precipitación	666.49	610.6	0.92	SD	SD	NA
ETR	524.48	376.28	0.72	SD	SD	NA
Escorrentamiento	132.48	112.69	0.85	SD	SD	NA
Infiltración	9.53	105.29	11.05	SD	SD	NA

Cuadro 2.15: Comparación de resultados de balance anual y balance simulado mediante SWAT (valores en mm/año) con infiltración modificada.

Parámetro	B.A. (2014)	B.SWAT(2014)	SWAT/BA	B.A. (2015)	B.SWAT(2015)	SWAT/BA
Precipitación	446.73	419.32	0.94	781.44	649.22	0.83
ETR	382.49	332.33	0.87	586.41	393.93	0.67
Escorrentamiento	54.76	76.4	1.4	185.49	131.93	0.71
Infiltración	9.48	8.17	0.86	9.54	16.02	1.68
Parámetro	B.A. (2016)	B.SWAT(2016)	*	B.A. (2017)	B.SWAT(2017)	*
Precipitación	476.44	442.66	0.93	418.96	411.41	0.98
ETR	403.23	338.3	0.84	363.09	282.68	0.78
Escorrentamiento	63.71	62.4	0.98	46.39	56.45	1.22
Infiltración	9.5	7.56	0.79	9.48	10.43	1.1
Parámetro	B.A. (2018)	B.SWAT(2018)	*	B.A. (2019)	B.SWAT(2019)	*
Precipitación	666.49	610.6	0.92	SD	SD	NA
ETR	524.48	376.28	0.72	SD	SD	NA
Escorrentamiento	132.48	112.69	0.85	SD	SD	NA
Infiltración	9.53	19.45	2.04	SD	SD	NA

2.4. Evaluación de la Variabilidad Climática

La Variabilidad Climática (VC) considera cambios en los patrones climáticos (como precipitación y temperatura) en periodos de tiempo relativamente cortos donde los valores de estos parámetros son comparados con valores normales (Alzate, Rojas, Mosquera, y Ramón, 2015). Para poder determinar la VC en una región se hace uso de análisis de tendencias de datos que están basadas en pruebas estadísticas aplicadas a series de tiempo, estas series de tiempo se definen como una secuencia de valores de una variable, colectados en un tiempo y espacio determinado (Machiwal y Jha, 2012). La VC es ocasionada por tres fuen-

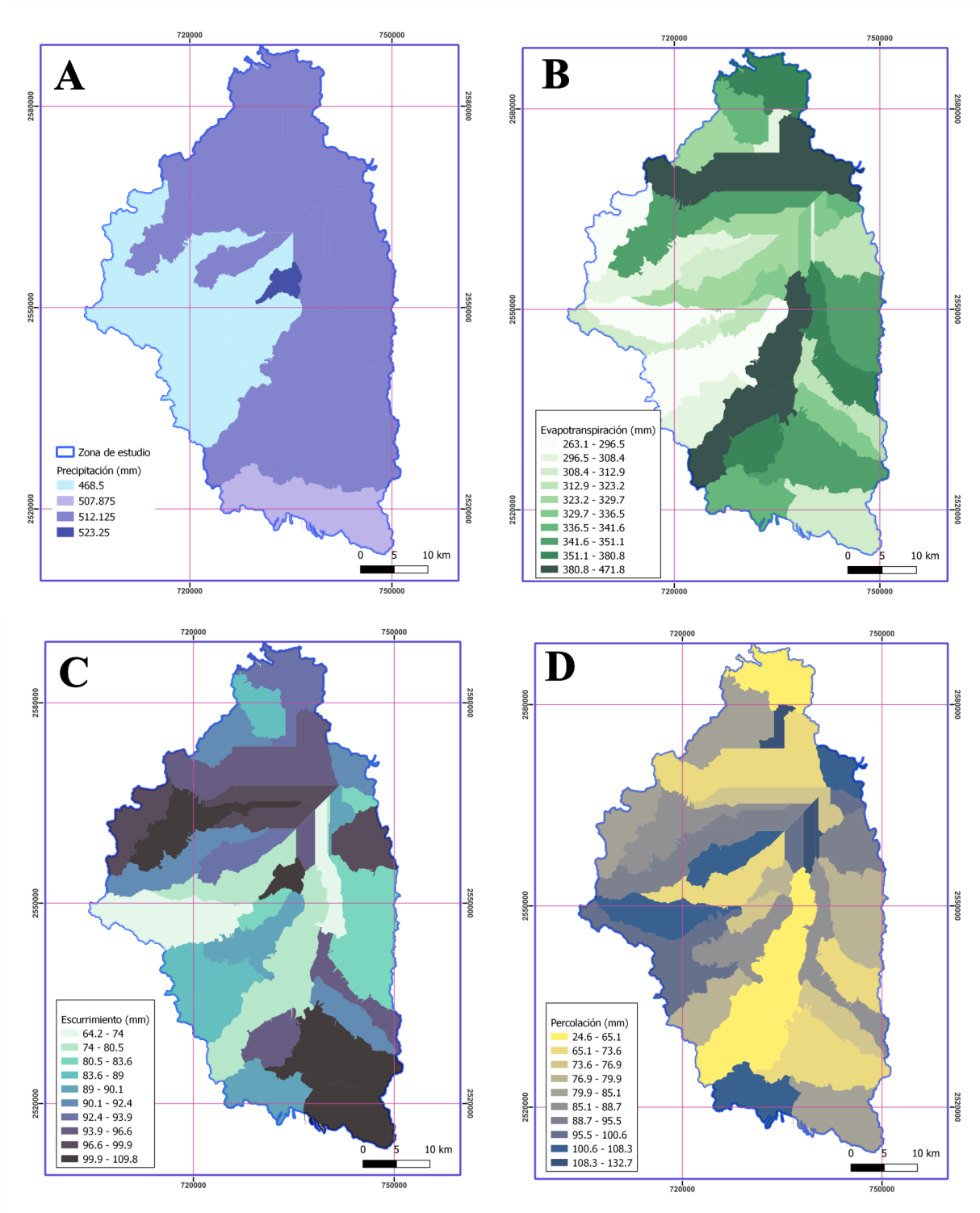


Figura 2.20: Distribución espacial de los valores (mm) de: A) precipitación media anual; B) ETR media anual; C) Escorrentamiento medio anual y D) Percolación media anual de los resultados de la modelación SWAT.

tes principales, debido a procesos internos, procesos externos y una combinación de ambos. Los procesos internos se deben a la interacción de los actores dentro del sistema climático (océanos, la superficie, atmósfera, biósfera, etc.). Los procesos externos se dan cuando por ejemplo el Cambio Climático interaccionan con el sistema (Mitchell, 1976). Para el análisis de las tendencias en las series de tiempo se utilizan métodos donde se evalúa la homogeneidad, la estacionalidad, la periodicidad, la persistencia. Para esta investigación se aplicarán los métodos de Mann-Kendall para detectar las tendencias y el método de la pendiente de Sen (*Sen's Slope*) para conocer la magnitud de cambio de estas tendencias.

2.4.1. Pruebas estadísticas en series de tiempo climáticas

2.4.1.1. Prueba de Mann-Kendall

Esta es una prueba no paramétrica que identifica la tendencia en una serie de tiempo, sin embargo, no identifica que tipo de tendencia existe. Mann (1945) utilizó originalmente esta prueba y en 1975 Kendall definió la distribución estadística de la prueba (Machiwal y Jha, 2012). Para definir la prueba se puede considerar una serie de tiempo $x_t(1, 2, 3, \dots, n)$ donde cada valor es comparado con su subsecuente (x_{t+1}) y se genera una nueva serie z_k .

$$\begin{aligned} z_k &= 1 & \text{para} & \quad x_t > x'_t \\ z_k &= 0 & \text{para} & \quad x_t = x'_t \\ z_k &= -1 & \text{para} & \quad x_t < x'_t \end{aligned}$$

La estadística de Mann-Kendall se define como:

$$S = \sum_{t'=1}^{n-1} \sum_{t=t'+1}^n z_k \quad (2.21)$$

Con $z_k = \text{sgn}(x'_t - x_t)$

$$S = \sum_{t'=1}^{n-1} \sum_{t=t'+1}^n \text{sgn}(x'_t - x_t) \quad (2.22)$$

S representa el valor de las diferencias positivas menos el de las negativas. El signo y valor de S muestra la dirección y la intensidad de la tendencia (Machiwal y Jha, 2012). Cuando la hipótesis nula (H_0 donde la serie de datos se suponen independientes e igualmente distribuidos) es verdadera, S es una distribución normal. Cuando la hipótesis nula es rechazada se acepta la hipótesis alternativa (H_1 los datos de la serie tienen una tendencia monoatómica, es decir, existe una relación entre los valores).

Para conocer el valor estadístico de la prueba se hace uso del conocimiento del valor z donde:

$$\begin{aligned}
Z &= \frac{S - 1}{(var(S))^{1/2}} & Si & S > 0 \\
Z &= 0 & Si & S = 0 \\
Z &= \frac{S + 1}{(var(S))^{1/2}} & Si & S < 0
\end{aligned}$$

con:

$$var(S) = \frac{1}{8}[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^g t_i(t_i-1)(2t_i+5)] \quad (2.23)$$

Donde g es el número de grupos empatados y t_i representa el número de observaciones en cada grupo empatado g . En el supuesto de que no se forman estos grupos en las series de tiempo hidrológicas (como la precipitación) la ecuación de la varianza puede ser definida como:

$$var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (2.24)$$

El signo de Z sugiere una tendencia al incremento (si es positivo) o decremento (si es negativo) (Maity y Maity, 2018). La significancia de estas tendencias será dada por la comparación del signo y valor de Z con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, lo cual es común en series de tiempo climáticas. Si el valor de Z es mayor a 1.96, la tendencia es significativamente positiva, si es menor a -1.96 la tendencia va hacia el decremento de forma significativa.

Para llevar a cabo el análisis de las tendencias se utilizó las paqueterías de *trend* dadas en el lenguaje de programación **R** y la interacción se hizo mediante *Rstudio* la cual es la interfaz más utilizada en la manipulación de datos mediante lenguaje R.

Primero se instaló la paquetería *trend* en la consola y se importó el archivo en formato 'xlsx' mediante la librería 'readxl' el cual contenía todos los valores de precipitación mensual de cada estación (para el análisis de series de precipitación) y temperatura mensual. La función definida para el análisis mediante Mann-Kendall se describe como "*mk.test(Nombre-Archivo.xlsx \$ Estación-n)*". La función arroja el promedio de los valores, la cantidad de datos, valor de p , la varianza de S y el valor de S así como el valor y signo de Z .

2.4.1.2. Magnitud de cambio de la tendencia (Prueba de pendiente de Sen)

Inicialmente llamdo pendiente de Kendall (β) dado por Sen (1968) y cuyo estudio extendió Hirsch en 1982, es un índice para cuantificar tendencias monótonas en series de tiempo hidrológicas (Machiwal y Jha, 2012). Este análisis exige que los datos de la serie de tiempo sean igualmente espaciados (mensuales o anuales). El valor de la pendiente está dado por:

$$\beta_{gk} = Media\left[\frac{x_{igk} - x_{jgk}}{i - j}\right] \quad para \quad todo \quad i < j \quad (2.25)$$

Donde:

β_{gk} es la pendiente entre los puntos igk y jgk , y estos puntos son los datos medidos en los tiempos i y j . El valor negativo de la pendiente sugiere que es una tendencia negativa y el valor positivo, una tendencia al aumento (Machiwal y Jha, 2012).

La evaluación de la pendiente se hizo aplicando la función "*sens.slop(Nombre-Archivo.xlsx \$ Estación-n)*". También otorga el promedio de los valores, la cantidad de datos, valor de p y el valor y signo de la pendiente la cual se traduce como el valor de la magnitud de cambio.

Cuadro 2.16: Resultados de las Tendencias en la precipitación aplicando el método de Mann-Kendall con datos de 1980-2018

Esta/mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
B. Tesoro	-0.31	0.562	1.344	-1.275	0.63	1.452	0.593	-0.605	2.94	-0.036	-0.183	-0.843
Calera	0.122	0.938	0.925	-1.796	-0.69	1.101	-0.29	-0.109	2.166	-0.303	2.023	-0.39
C.F.P.	-0.898	1.457	1.026	-1.044	-0.557	1.427	-0.109	0.109	3.69	0.266	0.962	-0.184
Flo.	-0.037	0.677	1.499	-1.147	-0.872	-0.254	0.303	-0.726	2.517	-0.75	-0.21	-1.108
Gpe.	-0.27	0.642	1.356	-0.759	0.436	0.593	0.339	1.5	1.234	-1.101	-0.403	-0.222
Jer.	-0.467	1.749	1.061	-0.462	0.411	1.089	-2.081	0.847	3.29	-0.061	-0.922	-0.769
Bufa	-0.481	-0.321	2.109	0.215	-1.719	-1.234	-1.016	-0.944	1.367	-1.5	-0.353	-1.549
Mpso.	-0.574	0.717	1.52	-0.467	0.843	0.871	1.21	1.44	3.617	1.438	1.418	-0.409
Sn. Rosa	-0.558	1.098	0.787	-1.825	0.133	0.351	-0.799	0.254	3.411	0.012	-0.62	-0.887
Sn A. Cipres	-0.335	0.779	0.741	-0.694	-0.607	0.133	0.121	-0.242	1.899	0	0.122	-1.296
Sn. Gero.	-1.163	0.996	0.984	-2.03	-0.109	0.302	1.258	0.073	2.105	-1.658	0.377	-1.974

Cuadro 2.17: Magnitud de cambio en las tendencias de precipitación con datos de 1980-2018

Esta/mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
B. Tesoro	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	0.3	-0.4	1.61	0.0	0.0	-0.1
Calera	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.2	0.8	-0.3	0.0	1.3	-0.1	0.3	0.0
C.F.P.	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	1.0	0.0	0.1	2.6	0.1	0.1	0.0
Flo.	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.2	0.2	-0.3	1.7	-0.2	0.0	-0.1
Gpe.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5	0.8	0.8	-0.4	0.0	0.0
Jer.	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	0.6	-1.5	0.7	1.9	0.0	-0.1	-0.1
Bufa	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.4	-0.9	-1.3	-0.8	0.8	-0.5	0.0	-0.1
Mpso.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.1	1.0	2.7	0.5	0.0	0.0
Sn. Rosa	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	-0.6	0.2	2.1	0.0	0.0	-0.1
Sn A. Cipres	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.1	0.1	-0.2	1.2	0.0	0.0	0.0
Sn. Gero.	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0	0.1	1.5	-0.5	0.0	-0.2

En el cuadro 2.17 es evidente que en el mes de septiembre es cuando ocurren los cambios significativos en las tendencias, cosa que no ocurre en los demás meses. En el caso de los datos del cuadro 2.18 las magnitudes o tendencias no siguen un patrón tan evidente, lo que es importante remarcar en las estaciones Jerez (Jer) y Chichimequillas (Chich) en casi todos los meses existe un aumento de temperatura mensual que en promedio son 0.065°C y 0.067°C respectivamente. En el caso del análisis anual de VC se puede notar que la estación BF (La Bufa) la tendencia va hacia el decremento de la temperatura, esto puede deberse a que es una estación colocada a más de 2500 m.s.n.m. considerando esta tendencia la magnitud de cambio promedio en la precipitación es de 1.61 mm anuales, sin embargo dejando de fuera este valor

Cuadro 2.18: Magnitud de cambio en las tendencias de temperatura media con datos de 1980-2018

Esta/mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
BocaT	0.0375	0.0613	0.04	0.03	0.035	0.0389	0.0571	0.0500	0.0500	0.0292	0.0200	0.0826
Cal	0.0167	0.0533	0.0200	0.0375	0.0258	-0.0143	0.0000	0.0176	0.0053	0.0200	0.0120	0.0212
CFP	0.0167	0.0600	0.0448	0.0526	0.0586	0.0467	0.0680	0.0615	0.0307	0.0250	0.0174	0.0364
Chich	0.0318	0.0583	0.0917	0.1	0.1000	0.0552	0.0667	0.0788	0.0552	0.0600	0.0429	0.0364
Sauz	-0.0055	-0.0083	-0.0364	-0.047	-0.0485	-0.0304	-0.0028	0.0000	0.0040	-0.0083	-0.031	-0.0167
Fllo	-0.0385	-0.0250	-0.0111	-0.0110	-0.0181	-0.0373	-0.0231	0.0000	-0.0222	0.0058	-0.0500	-0.0523
Gpe	0.0065	0.0114	0.0190	0.0727	0.0722	0.0450	0.0385	0.0500	0.0250	0.0216	-0.0140	0.0143
Jerez	0.0520	0.0870	0.0762	0.0680	0.0750	0.0583	0.0750	0.0735	0.0500	0.0680	0.0714	0.0486
Malp	-0.0571	-0.0316	-0.0330	0.0000	0.0000	0.0330	0.0037	0.0238	-0.0042	-0.0167	-0.0600	-0.0642
Sgeras	0.0318	0.0417	0.0400	0.0600	0.0350	0.0250	0.0366	0.0407	0.0330	0.0307	0.0000	0.0148
Srosa	0.0029	0.0353	0.0211	0.0462	0.0370	0.0095	0.0096	0.0243	0.0034	0.0000	0.0000	0.0000
SAC	-0.1250	-0.0830	-0.1000	-0.0301	-0.0028	-0.0048	-0.0208	0.0034	-0.0297	-0.0387	-0.1178	-0.1035

atípico el promedio anual de cambio en la precipitación es de 2.203 mm, en el cuadro 2.19 se muestran los resultados anuales de las tendencias (T) y Magnitudes de Cambio (M.C.) de las estaciones en juego.

Cuadro 2.19: Resultados de las tendencias en PMA y TMA y magnitudes de cambio para las distintas estaciones (en mm en precipitación y °C en temperatura)

Estación	Clave	T.(PMA)	M.C.(PMA)	T. (TMA)	M.C.(TMA)
Boca del T.	32002	1.234	2.507	4.6708	0.044
Calera	32003	0.4113	1.192	2.202	0.019
Cañitas de Felipe	32005	2.0323	4.385	3.0973	0.046
Fresnillo	32020	0.6412	1.547	-0.3509	-0.004
Guadalupe	32121	1.0161	2.243	2.6265	0.024
Jerez	32026	0.9678	1.543	5.2266	0.061
Malpaso	32099	2.0807	5.3	-1.9719	-0.02
Santa Rosa	32053	0.6774	1.654	1.0163	0.018
San Antonio C.	32047	0.7258	1.354	-3.2301	-0.053
San Gerónimo	32131	0.43549	0.89	3.642	0.033
La Bufa	32031	-1.4758	-4.814	*	*
Chichimequillas	32137	*	*	5.5287	0.056
El Sauz	32018	*	*	-2.7836	-0.019

2.4.2. Discusión del modelo conceptual

Los valores de precipitación y temperatura media son consistentes con lo encontrado y citado por la literatura, la empresa Ingeniería y Gestión Hídrica (IGH) utilizando el método de isoyetas concretó valores de precipitación y temperatura de 425 mm/año y 16.3°C/año respectivamente. Krienen (2018) los estableció la precipitación en 410 mm/año y la temperatura media anual de 15.6 °C utilizando datos de la estación Calera.

El balance de agua siguió una metodología similar a la indicada en la NOM-011-CONAGUA-2015. Este método fue el seguido en la determinación de la disponibilidad en el modelo creado por IGH en 2010. Esta metodología contempla la recarga total sobre el acuífero, la descarga natural comprometida y los valores de extracción otorgados por el REPDA. IGH estimaron una disponibilidad de -31.61 hm^3 al año. Krienen (2018) siguió una metodología más específica diversificando la recarga vertical tanto natural como la inducida tomando en cuenta áreas de recarga debido al retorno agrícola, de uso público urbano y entradas por flujo horizontal diferente a la recarga vertical. En este proyecto se planteó una forma distinta de recarga. Se tomó en consideración lo planteado por Krienen en proponer una recarga tomando en cuenta los usos de agua (retorno agrícola y urbano) y la dada por la precipitación, a diferencia del modelo de 2018, para este modelo se consideró tomar el 5 % de estos parámetros de recarga y no el 2.5 %. Además de atender lo establecido en el modelo conceptual de Pacheco-Guerrero con las pérdidas de transmisión en las zonas de recarga como forma principal de ingreso de agua en el acuífero. El balance general anual para los años con mediciones del nivel estático indicó déficit de agua en los siete años considerados. El año 2009 presenta el mayor desbalance debido a la poca cantidad de pozos de observación involucrados.

Los análisis hidrogeoquímico de Navarro (2017) y Rivera-Armendáriz (2022) sugieren la presencia de flujos locales, intermedios y regionales. Este proyecto toma en consideración principalmente a los flujos locales o aguas de reciente infiltración como forma principal de recarga. Las entradas de flujo de otros acuíferos no se consideraron dada la escasa información al respecto. Krienen (2018) citando el modelo realizado por IGH (2010) insinuó una interacción con el agua del acuífero administrativo de Chupaderos (1997) por medio de un flujo regional que asciende verticalmente por las fallas geológicas en la cuenca del acuífero de Calera, sin embargo, sugirió que, dado los valores más actuales de la piezometría, esto debe ser verificado mediante análisis hidrogeoquímico. Júnez-Ferreira (2013) sugiere que existe salida de agua del acuífero de Calera hacia el acuífero de Chupaderos en la porción noreste, sin embargo, el modelo de esta investigación (2023) sólo sugiere salidas de flujo horizontal hacia el acuífero administrativo de Benito Juárez.

Una de las desventajas del modelo actual es que no se considera la influencia de las fallas geológicas locales y regionales determinadas por Krienen en 2018. Se ha demostrado que las fallas son una forma importante de recarga en este tipo de acuíferos además de ser la principal forma de interacción de flujos con otros acuíferos. Estas zonas de falla deben ser discretizadas de forma local y proponer una interacción con el agua como lo planteado por Bense (2013). Esta interacción es visible en un modelo numérico del acuífero realizado en FeFlow donde esta discretización es posible.

La comparación de los resultados del modelo de agua superficial (SWAT) indican una similitud de regular a buena (mayor al 50 %) en todos los parámetros no involucrando a la infiltración-percolación. No obstante Wang y Chen (2021) indicaron que es común que este parámetro sea sobreestimado por el código SWAT en la mayoría de las ocasiones. Por otro lado, la verificación de las tendencias climáticas sugieren aumento de la precipitación en el mes de septiembre en casi todas las estaciones analizadas, no habiendo cambios en los meses con menos lluvia.

69



Capítulo 3

Implementación del modelo numérico de flujo de agua subterránea

3.1. Introducción

MODFLOW es un código que modela el flujo de agua subterránea mediante el método de diferencias finitas llamado en un inicio *USGS Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model* realizado en **Fortran 66**. La primera versión de este código fue impulsada por McDonald y Harbaugh en 1984, esto surge de la necesidad de crear un código computacional usado para la simulación, que fuera sencillo de entender y fácilmente modificable (Harbaugh, 2005). Al año 1988 debido a cambios en el lenguaje de programación fue llamado MODFLOW-88 McDonald y Harbaugh (1988) dieron lugar a las siguientes versiones del código (MODFLOW 1996, 1996a, 1996b, 2000, 2005). La versión más reciente del código es la del año 2005. Esta contiene la mejoría de generar paquetes de código que ayude a entender mejor los procesos físicos. Por ejemplo el paquete de *River* que simula los efectos de un río en la zona, el paquete de *Wells* simula los efectos en los pozos a procesos de recarga y descarga, por mencionar algunos (Harbaugh, 2005).

En años más recientes se creó la necesidad de construir una plataforma de interfaz gráfica. Así nace *Visual MODFLOW* que da herramientas para la manipulación en tres dimensiones del modelo numérico conceptual, calibración más interactiva y menor pre procesamiento de los datos iniciales. Para este caso de estudio se utilizó *Visual MODFLOW* en su versión 2009.1.

Mientras que el método de diferencias finitas (MDF) ayuda en la construcción de la matriz de solución que tiene n columnas por m filas y p capas (una ecuación lineal por cada nodo o celda) no soluciona el sistema de ecuaciones. MODFLOW en su versión con interfaz integrada (Visual MODFLOW) utiliza diversos paquetes o métodos de solución numérica como *Gradiente conjugado preconditionado (PCG2)*, *Procedimiento fuertemente implícito (SIP)*, *Cortes sucesivos (SOR)*, *Solucionador geométrico multigrado (GMG)*, *Sistema algebraico de multi-malla (SAMG)* y el más comúnmente usado *Solucionador WHS para VMOD Flex (WHS)*. Cada método de solución se elige dadas las condiciones y capacidades de la computadora y

la necesidad del usuario. El Método *WHS* está basado en el método Gradiente Biconjugado estabilizado el cual es un método de solución de ecuaciones lineales a partir de "descensos" máximos y mínimos.

3.2. Diseño del modelo

3.2.1. Ecuación general de gobierno de agua subterránea

En el campo de la ciencia y la ingeniería se describen muchos procesos mediante expresiones matemáticas, afortunadamente el campo de la hidrogeología también sigue esta línea (Woessner y Eileen, 2020) debido a que se toma el sistema acuífero como un medio continuo poroso donde aplica la ley de Laplace de continuidad (Custodio, Llamas, y cols., 1983). La ecuación de gobierno del agua subterránea nace de la Ley de Darcy, la cual relaciona las propiedades del material donde transita el agua, el área de la sección, las cargas piezométricas, la distancia del recorrido del agua (Woessner y Eileen, 2020), (Hölting y Coldewey, 2019), (Freeze y Cherry, 1977) (ver ecuación 2.14). Al tratar la ley de Darcy con la Ley de conservación de la materia la ecuación general de gobierno de agua subterránea se presenta. Dado el desarrollo matemático de dicha ecuación se generan ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (Woessner y Eileen, 2020). La solución analítica de este tipo de ecuaciones es complicada cuando muchas variables entran en juego, para solucionarlas se utilizan métodos numéricos como el MDF y MEF. La ecuación general de flujo de agua subterránea para un medio heterogéneo y en estado transitorio es:

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W \quad (3.1)$$

Ss: Es el almacenamiento específico (*Specific storage* ($1/L$)). El almacenamiento específico o simplemente almacenamiento es la capacidad de un acuífero para almacenar o drenar agua. También puede definirse como el volumen de agua removido o almacenado por una unidad de cambio en la carga perpendicular a la superficie, por unidad de área (Woessner y Eileen, 2020). **h** (*Head* (m)) es la carga piezométrica en un punto dado en un momento determinado. **K** es la conductividad hidráulica (m/s) en las direcciones xyz. La conductividad hidráulica es una propiedad del medio. Este coeficiente de permeabilidad (así también llamado) define la resistencia del flujo al fluir a través de un material poroso. Este valor depende de las propiedades de la roca (como la porosidad) y de las propiedades del agua (como la viscosidad, temperatura, densidad, etc.) (Hölting y Coldewey, 2019). **W** (*Water* (m^3)) es el agua que sale o ingresa al sistema ya sea en forma de recarga o extracción mediante pozos de bombeo. Existen generalidades de la ecuación 3.1 para casos ideales como un sistema homogéneo, confinado, isótropo y estacionario dando lugar a la ecuación de Laplace:

$$-W = K \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) \quad (3.2)$$

En muchos de los casos inicialmente se hacen varias suposiciones como en la ecuación de Laplace para poder obtener soluciones analíticas de ecuaciones diferenciales, sin embargo, estas respuestas pueden estar muy alejadas de la realidad (H. F. Wang y Anderson, 1995).

Para no hacer muchas suposiciones se recurre a la utilización de métodos numéricos. Con el avance en la investigación computacional, la modelación numérica de eventos naturales avanzó notablemente. Las computadoras son cada vez más capaces de solucionar sistemas de ecuaciones más grandes (Kresic, 2006). Para el caso de estudio se centra en la solución mediante el MDF el cual es el método base del código **MODFLOW**.

3.2.2. Solución numérica de la ecuación de gobierno de flujo de agua subterránea

3.2.2.1. Método de diferencias finitas

El MDF al igual que el MEF parte de la discretización del espacio y el tiempo. En MDF es común el discretizado por celdas rectangulares. Esta discretización permite resolver ecuaciones lineales en lugar de ecuaciones diferenciales. Para explicar el método tomaremos de ejemplo un espacio dividido en nueve celdas con condiciones de frontera y condiciones iniciales.

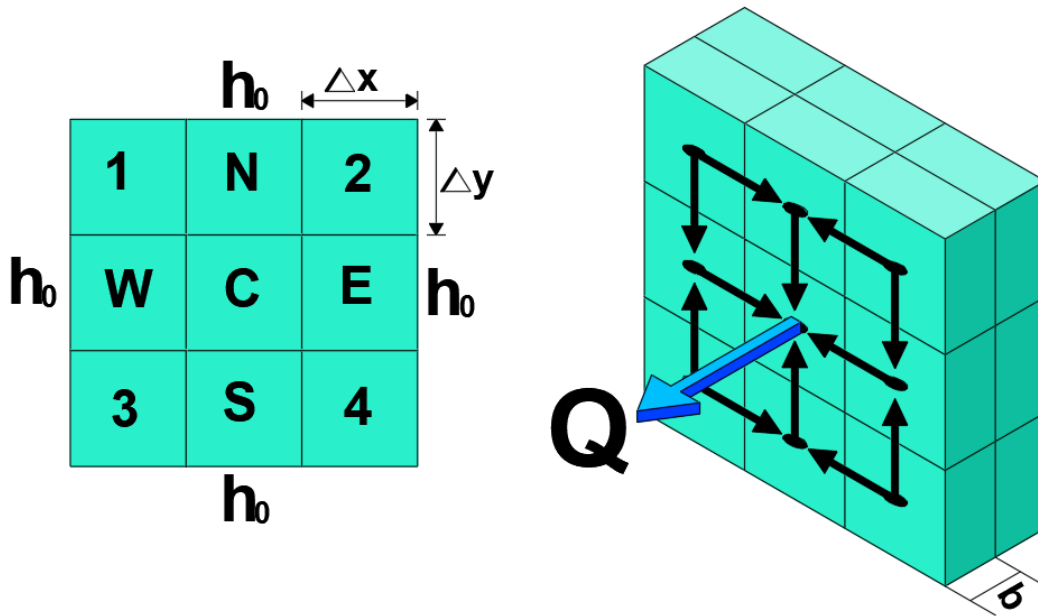


Figura 3.1: Ejemplo de espacio discretizado en nueve celdas con condiciones de iniciales.

La ecuación de continuidad es aplicada a una celda (celda C) donde convergen los flujos de las celdas aledañas (flujos que ingresan a la celda) y el flujo que sale de la celda (Q). h_0 representan las condiciones iniciales de cargas conocidas. Así, Caudal que ingresa - Caudal que sale = cambio en el almacenamiento, es decir:

$$Q_{wc} + Q_{ec} + Q_{nc} + Q_{sc} = S_s \left(\frac{dh}{dt} \right) \Delta x \Delta y b \quad (3.3)$$

Con $Q = KiA$ e $i = dh/dt$. La ecuación anterior se puede escribir con j como instante inicial y $j + 1$ como instante posterior es decir $t + \Delta t$.

$$K_x \frac{h_w - h_c}{\Delta x} \Delta y b + K_x \frac{h_e - h_c}{\Delta x} \Delta y b + K_y \frac{h_n - h_c}{\Delta y} \Delta x b + K_y \frac{h_s - h_c}{\Delta y} \Delta x b = S_s \frac{h_c^{j+1} - h_c^j}{\Delta t} \Delta x \Delta y b \quad (3.4)$$

En un estado homogeneo con $K_x = K_y$, $T = K^*b$ y almacenamiento $(S) = S_s^*b$ (el caso de un acuífero confinado).

$$T \frac{h_w - h_c}{\Delta x} \Delta y + T \frac{h_e - h_c}{\Delta x} \Delta y + T \frac{h_n - h_c}{\Delta y} \Delta x + T \frac{h_s - h_c}{\Delta y} \Delta x = S \frac{h_c^{j+1} - h_c^j}{\Delta t} \Delta x \Delta y \quad (3.5)$$

Lo que se reduce si dividimos a la ecuación por $\Delta x * \Delta y$:

$$T \frac{h_w - h_c}{\Delta x^2} + T \frac{h_e - h_c}{\Delta x^2} + T \frac{h_n - h_c}{\Delta y^2} + T \frac{h_s - h_c}{\Delta y^2} = S \frac{h_c^{j+1} - h_c^j}{\Delta t} \quad (3.6)$$

En celdas cuadradas podremos hacer $\Delta x = \Delta y$ y por conveniencia quitaremos el divisor Δt del segundo término de la ecuación anterior multiplicando por $\Delta t/S$. Hacemos $T\Delta t/S\Delta x^2 = \lambda$ y la ecuación finalmente nos queda como:

$$\lambda(h_w - h_c) + \lambda(h_e - h_c) + \lambda(h_n - h_c) + \lambda(h_s - h_c) = h_c^{j+1} - h_c^j \quad (3.7)$$

En el instante j (el instante actual) la solución en el punto C (centro de la celda C) es:

$$\lambda h_w^j + \lambda h_e^j + \lambda h_n^j + \lambda h_s^j - \lambda h_c^j(1 - 4\lambda) = h_c^{j+1} \quad (3.8)$$

Para los siguientes nodos las ecuaciones son:

1. Nodo 1:

$$4\lambda h_0^j + \lambda h_n^j + \lambda h_w^j + h_1^j(1 - 6\lambda) = \lambda h_1^{j+1} \quad (3.9)$$

2. Nodo N:

$$\lambda h_1^j + \lambda h_2^j + 2\lambda h_0^j + \lambda h_e^j + h_n^j(1 - 5\lambda) = \lambda h_n^{j+1} \quad (3.10)$$

3. Nodo 2:

$$4\lambda h_0^j + \lambda h_n^j + \lambda h_e^j + h_2^j(1 - 6\lambda) = \lambda h_2^{j+1} \quad (3.11)$$

4. Nodo W:

$$2\lambda h_0^j + \lambda h_e^j + \lambda h_1^j + \lambda h_3^j + h_w^j(1 - 5\lambda) = \lambda h_w^{j+1} \quad (3.12)$$

5. Nodo E:

$$2\lambda h_0^j + \lambda h_e^j + \lambda h_2^j + \lambda h_4^j + h_e^j(1 - 5\lambda) = \lambda h_e^{j+1} \quad (3.13)$$

6. Nodo 3:

$$4\lambda h_0^j + \lambda h_n^j + \lambda h_w^j + h_3^j(1 - 6\lambda) = \lambda h_3^{j+1} \quad (3.14)$$

7. Nodo S:

$$\lambda h_3^j + \lambda h_4^j + 2\lambda h_0^j + \lambda h_e^j + h_s^j(1 - 5\lambda) = \lambda h_s^{j+1} \quad (3.15)$$

8. Nodo 4:

$$4\lambda h_0^j + \lambda h_s^j + \lambda h_e^j + h_4^j(1 - 6\lambda) = \lambda h_4^{j+1} \quad (3.16)$$

La cual da origen a una matriz diagonal que nos lleva a la resolución de un sistema de ecuaciones lineales.

$$\begin{bmatrix} (1-6\lambda) & \lambda & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & (1-5\lambda) & \lambda & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & (1-6\lambda) & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & 0 & 0 & (1-5\lambda) & \lambda & 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & \lambda & (1-4\lambda) & \lambda & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 & \lambda & (1-5\lambda) & 0 & 0 & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & (1-6\lambda) & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & \lambda & (1-5\lambda) & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & \lambda & (1-6\lambda) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

La cual se multiplica por el vector:

$$\begin{bmatrix} h_1^j \\ h_n^j \\ h_2^j \\ h_w^j \\ h_e^j \\ h_e^j \\ h_3^j \\ h_s^j \\ h_4^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1^{j+1} - 4\lambda h_0^j \\ h_n^{j+1} - 2\lambda h_0^j \\ h_2^{j+1} - 4\lambda h_0^j \\ h_w^{j+1} - 2\lambda h_0^j \\ h_e^j \\ h_e^{j+1} - 2\lambda h_0^j \\ h_3^{j+1} - 4\lambda h_0^j \\ h_s^{j+1} - 2\lambda h_0^j \\ h_4^{j+1} - 4\lambda h_0^j \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

3.3. Implementación del modelo

La implementación es la traducción del modelo conceptual al modelo numérico descrito al inicio de este capítulo. Esta traducción involucra tanto las propiedades del medio, las características de la recarga, las entradas y salidas de flujo horizontal, la extracción de agua, en un espacio - tiempo discretizado por una malla de nodos con características particulares. La parte final de la construcción del modelo numérico es la calibración y validación del mismo para dar lugar a la simulación de pronósticos (ver el siguiente capítulo).

3.3.1. Geometría del modelo

El Aq Cal es un sistema conformado por *Horst - Graven* los cuales son bloques separados por fallas cuyos bloques con mayor elevación topográfica son conocidos como *Horst* y los bloques hundidos son conocidos como *graven* (Tarbuck, Lutgens, y Tasa, 2005). Este tipo de estructuras dio lugar a la fosa tectónica de Calera. Esta fosa fue rellena de material producto de la erosión que se fue acumulando y dando lugar a un valle con drenaje dendrítico con pendiente de sur a norte. Estos depósitos dan lugar a un acuífero libre heterogéneo con presencia materiales arcillosos de baja conductividad hidráulica que generan semiconfinamientos.

Las profundidades de las diferentes fm y su ubicación fueron realizadas por Rivera-Armendáriz y Cauich-Kau (2019) mediante métodos geofísicos. Realizaron muestreos aplicando el método **TEM**, *transient electromagnetic method* utilizando un equipo de la marca *Terra TEM* con *loops* de 150 m x 150 m. Se establecieron seis unidades geoelectricas y se construyeron ocho secciones geológicas elaboradas con 163 puntos de muestreo y 13 puntos realizados por Krienen (2018). Las unidades definidas por Krienen y Rivera establecen la unidad geoelectrica **U1a/b** engloba a los materiales granulares como la fm Aluvial (Qal) y el conglomerado polimictico (Ts(cp)). La unidad **U2a/b** se relaciona a las rocas volcánicas con resistividades (ρ) medias entre 25 - 50 Ω . El granito y la granodiorita conforman la unidad **U3**, mientras que las formaciones de rocas lutita-areniscas como la fm Caracol y calizas como la fm Indidura agrupan la unidad geoelectrica **U4** con resistividades de 75 - 100 Ω . La fm Chilitos y la fm Zacatecas conforman las dos últimas unidades con las resistividades más altas. La fm Chilitos (**U5a/b**) con valores de entre 100 y 175 y la fm Zacatecas (**U6**) de 200 a 250 Ω . Las profundidades de análisis van de los 600 m (2300 a 1700 msnm) en los puntos más altos al sur, a los 300 m (2100 a 1800 msnm) en la parte norte del acuífero.

Las unidades geoelectricas más la edad de la formación y sus características hidráulicas dieron lugar a cuatro unidades hidroestatigráficas definidas por Krienen (2018). Estas propiedades se resumen en el cuadro 3.1. En la figura 3.4 se observan los puntos de muestreo y

Cuadro 3.1: Unidades geoelectricas e hidroestatigráficas. Elaboradas por Krienen (2018), Rivera-Armendáriz y Cauich-Kau (2019).

Estatigrafía	Unidad Geoelectrica	Resistividad (ohm)	Unidad H.
Sedimentos Aluviales	U1 a	5 – 10	QTU
Conglomerado Polimítico	U1 b	10 – 15	QTU
Basaltos	U2 a/b	20 – 25	Tv
Riolitas	U2 a/b	25 – 50	Tv
Tobas riolíticas	U2 a/b	25 – 50	Tv
Ignimbritas	U2 a/b	25 – 50	Tv
Granito	U3	250	Tv
Rocas calizas	U4	75 – 10	Ccal
Formación chilitos	U5a/b	200 – 225	TMvs
Formación Zacatecas	U6	225	TMvs

en la figura 3.2 y 3.3 se muestran las secciones inferidas a partir de estos estudios geofísicos.

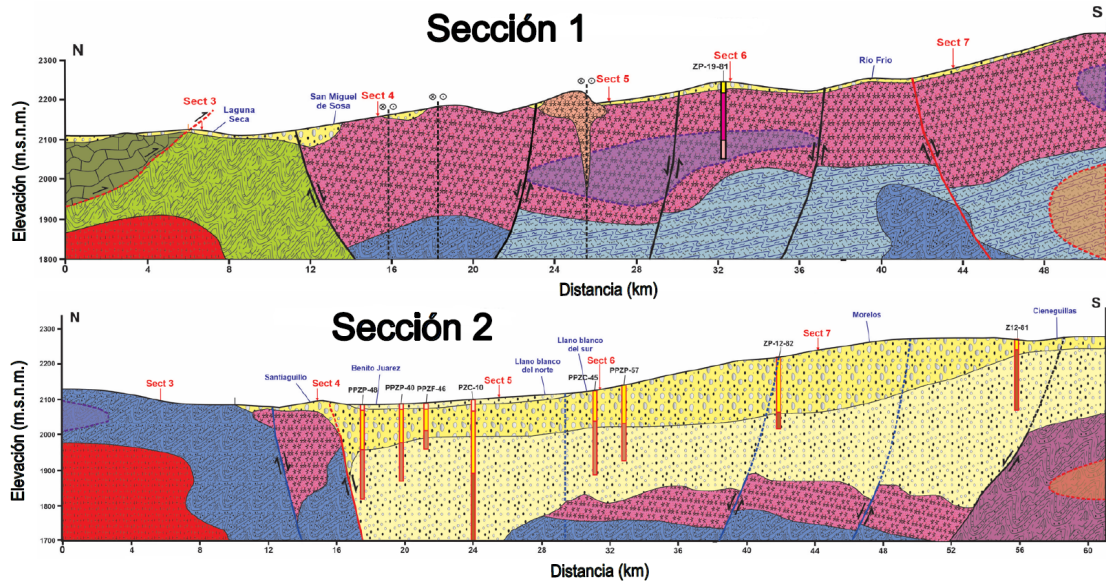


Figura 3.2: Secciones geológicas No. 1 y 2. Elaborados por Rivera-Armendáriz (2019).

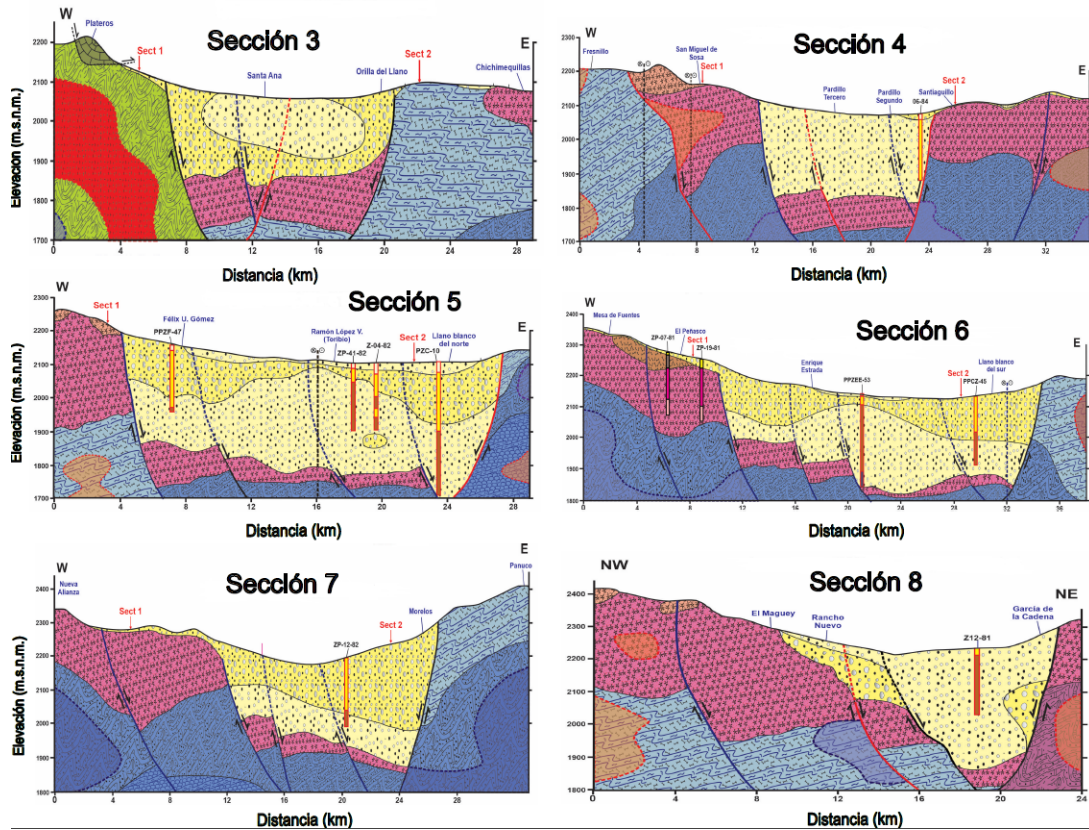


Figura 3.3: Secciones geológicas 3 - 8. Elaborados por Rivera-Armendáriz (2019).

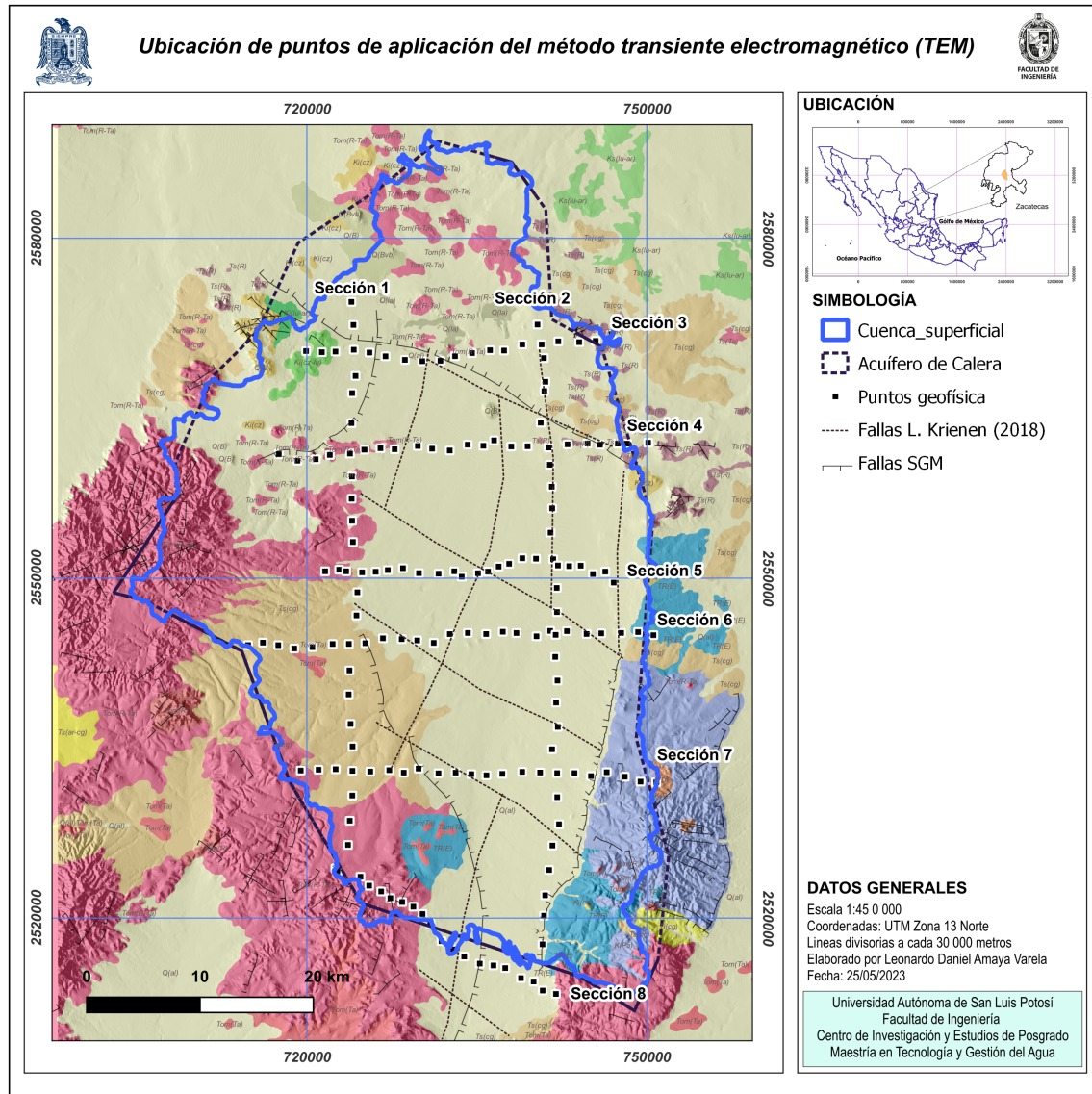


Figura 3.4: Puntos de muestreo geofísico mediante el método transiente electromagnético. Elaboración propia con datos de SGM, Rivera y Cauich (2019) y Krienen (2018).

3.3.2. Discretización espacial

La discretización espacial tiene la función de acotar en un espacio finito las características inherentes a él. En este modelo se utilizaron un arreglo de celdas con dimensiones en el plano xy de 500 x 500 metros y con espesores variados en dirección al eje z . Este arreglo de elementos está distribuidos de forma uniforme dentro de un polígono rectangular delimitado por los vértices cuyas coordenadas (UTM zona 13N) son:

1. X: 699000; Y: 2593600
2. X: 759000; Y: 2593600
3. X: 759000; Y: 2503600

4. **X:** 699000; **Y:** 2503600

El polígono definido cubre un área superficial de 5 400 km^2 y creó una zona de 120 columnas x 168 filas. En la dirección vertical el modelo se dividió en nueve capas limitadas por superficies generadas a partir de las diferentes secciones geológicas presentadas en la subsección anterior. En total el modelo se compuso de 181, 440 celdas que dio lugar a una matriz de 181, 440 X 181, 440 nodos.

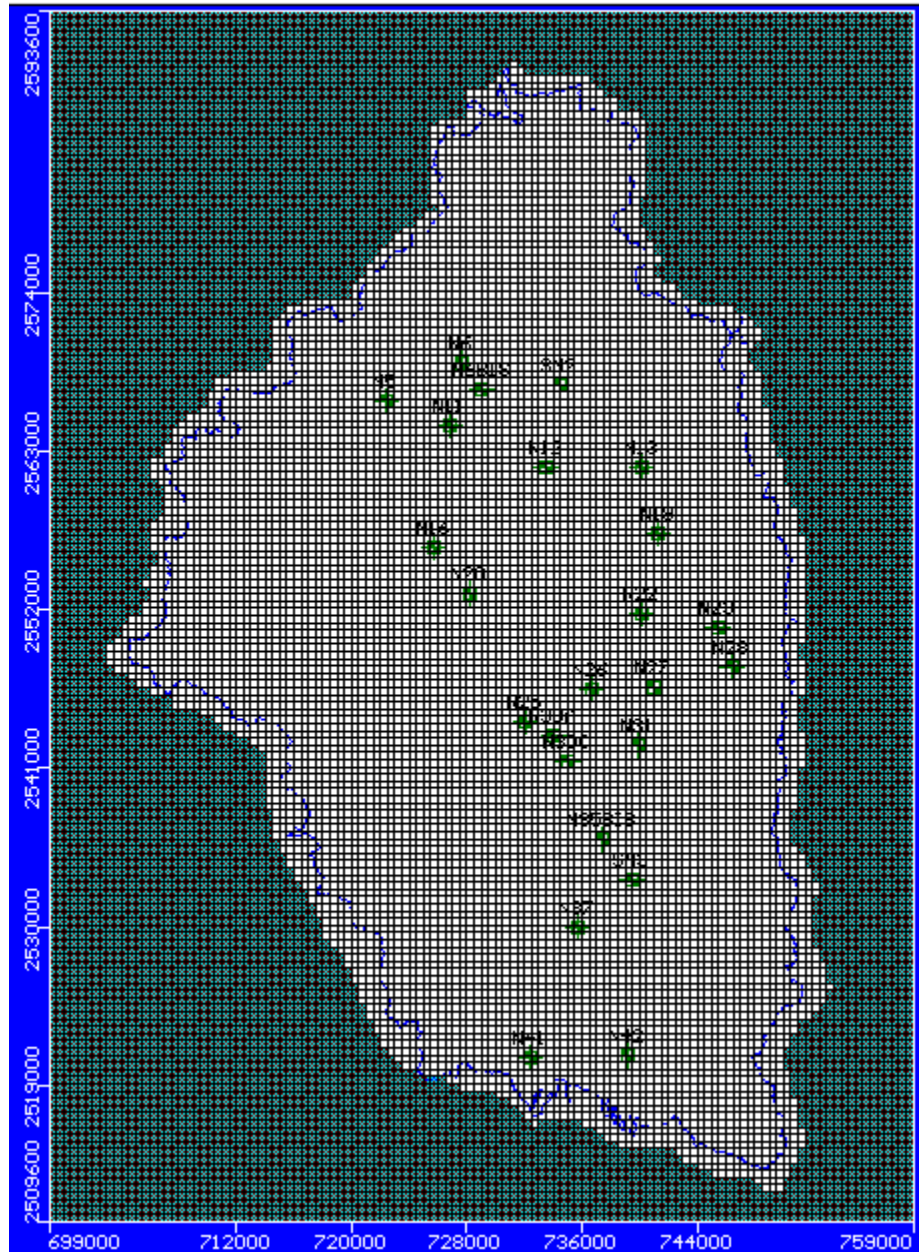


Figura 3.5: Planta de la discretización espacial. Elaborada mediante VMF.

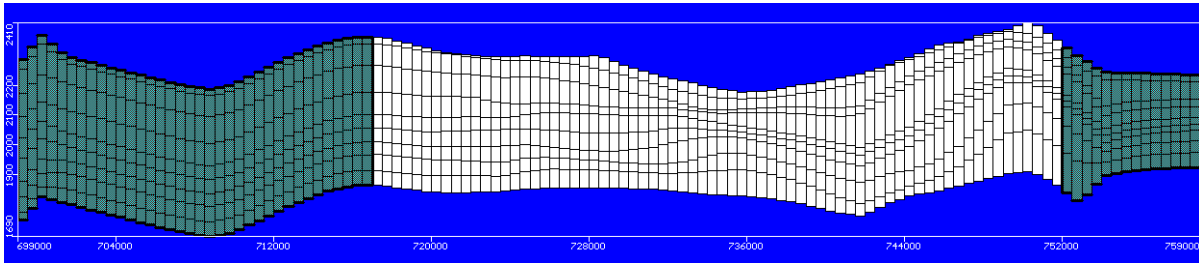


Figura 3.6: Corte transversal mostrando las columnas. Elaborada mediante VMF.

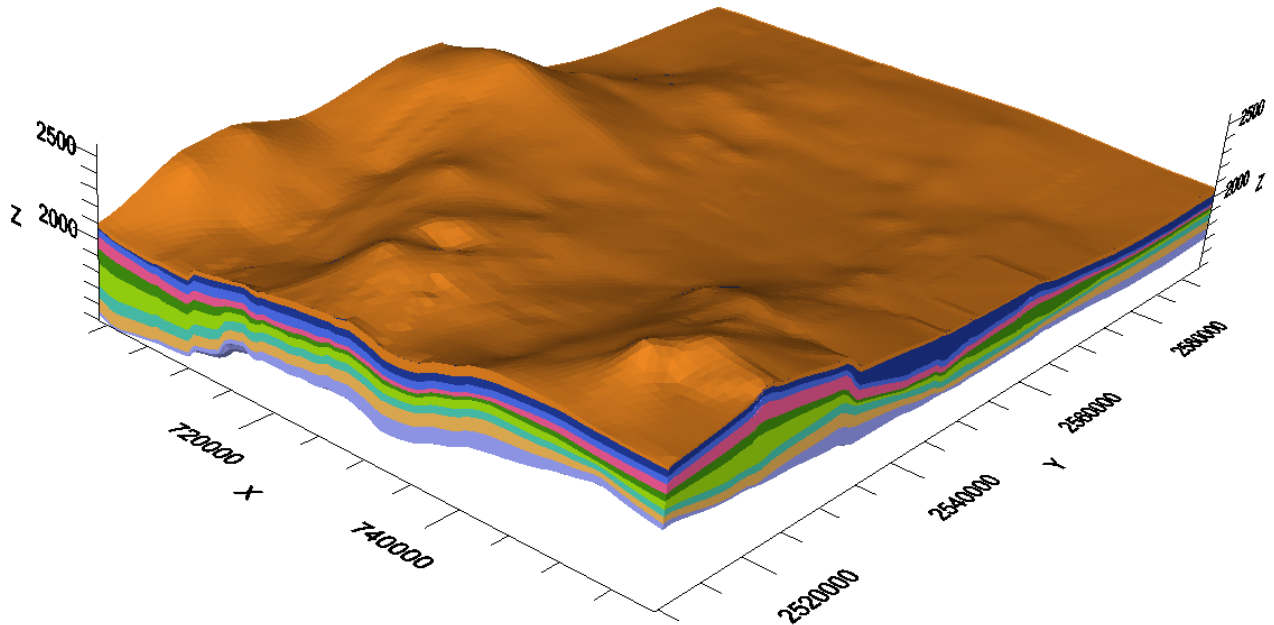


Figura 3.7: Identificación de las diferentes capas generadas por cada una de las superficies.

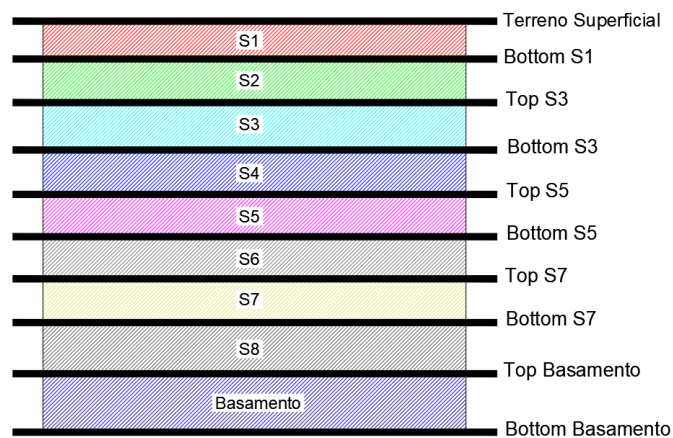


Figura 3.8: Nombramiento de cada una de las superficies y las capas generadas (*Slices*).

3.3.3. Discretización temporal

Temporalmente el modelo se discretizó tomando en consideración dos fechas: La primera, que es el día cero o día inicial, corresponde al día de medición del nivel estático de 1994,

como se desconoce la fecha exacta de la toma de niveles se le asignó la misma fecha de la fecha siguiente de medición, es decir, el primero de octubre de 1997. Es por lo tanto el día cero el día con fecha 01 de octubre de 1994. El día último corresponde al día con mediciones de nivel estático más actuales. Para esta fecha se toma a consideración los niveles medidos el mes de marzo de 2022 como parte de la campaña de verificación de pozos para el diseño de una red piezométrica automática. En total el modelo tiene un periodo de 10 065 días.

3.3.4. Propiedades hidráulicas del medio geológico

La geología se agrupó en cuatro unidades hidroestatigráficas (UH) definidas por Krienen en 2018. Una UH es un grupo de fm rocosas que comparten similitudes en edad y respuesta hidráulica al tránsito y almacenamiento de AS. La primera unidad es la **UH (QTU)** que engloba a los depósitos aluviales y conglomerados de gravas, arenas y arcillas. El agua en esta UH se mueve através de los poros vacíos de los depósitos. La segunda es la **UH (Tv)** que está formada por las rocas volcánicas del Terciario. El AS se mueve por las fracturas entre rocas, la gravedad juega un papel importante en este tipo de rocas ya que a diferencia de las otras UH, en rocas fracturas el agua suele moverse más rápido de forma vertical que horizontal. En tercer lugar está la **UH (Ccal)** donde se agruparon las rocas calizas de las formaciones del Cretácico. Es una zona de baja permeabilidad debido a la naturaleza de las rocas calizas. Esta unidad no tiene mucha presencia y se localiza en una porción norte. Finalmente la **UH (TMvs)** es la unidad de más baja permeabilidad conformada por rocas afines a la fm Chilitos del Cretácico y fm Zacatecas del Triásico. Es la UH más antigua y con mayor grado de compactación. Para más detalles ver tabla 3.1.

Las propiedades hidráulicas que requiere VMF son las conductividades hidráulicas (K) en x , y y z , el rendimiento específico (S_y), almacenamiento específico (S_s), porosidad efectiva (n_e) y porosidad total (n_t). Los valores iniciales propuestos se obtuvieron del modelo realizado por Ariel Consultores en el 2004 y por Lisa Krienen en el 2018. Estas propiedades se resumen en la tabla 3.2 donde K está en m/s , S_y y porosidades sin dimensiones y S_s en $1/m$.

Cuadro 3.2: Propiedades hidráulicas del medio geológico. Elaborada con datos de Ariel Consultores (2004) y Krienen L. (2018).

HU	Kx	Ky	Kz	Sy	Ss	ne	nt
QTU	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-07	0.05	0.002	0.33	0.33
Tv	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-02	0.045	0.002	0.2	0.25
Ccal	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	0.03	0.0035	0.2	0.2
TMvs	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	0.05	0.005	0.15	0.2

Estas propiedades se aplicaron sobre cada una de las nueve capas que se generaron (ver figura 3.8) conociendo la profundidad de cada fm en las diferentes secciones geológicas.

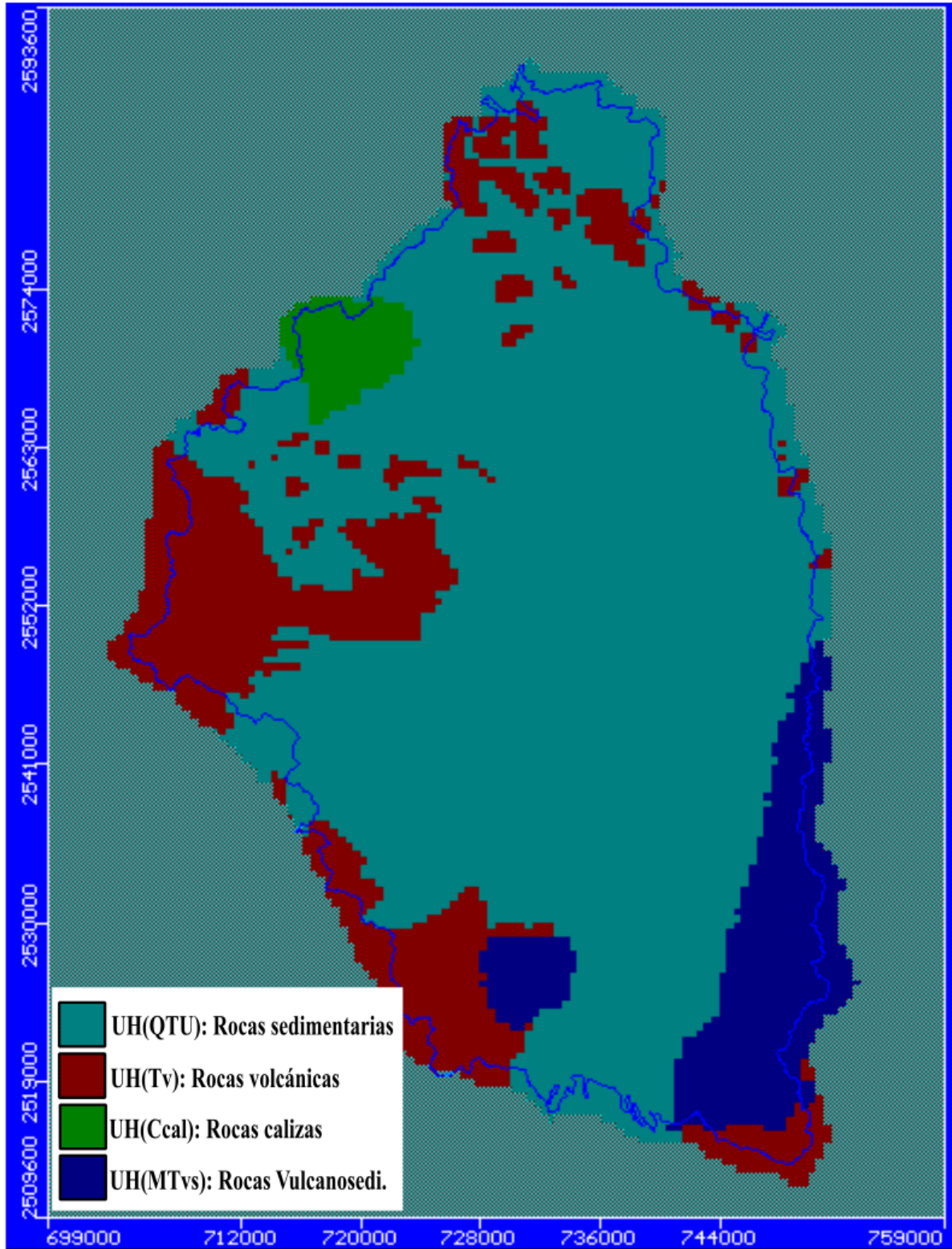


Figura 3.9: Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la zona de estudio (Terreno Superficial).

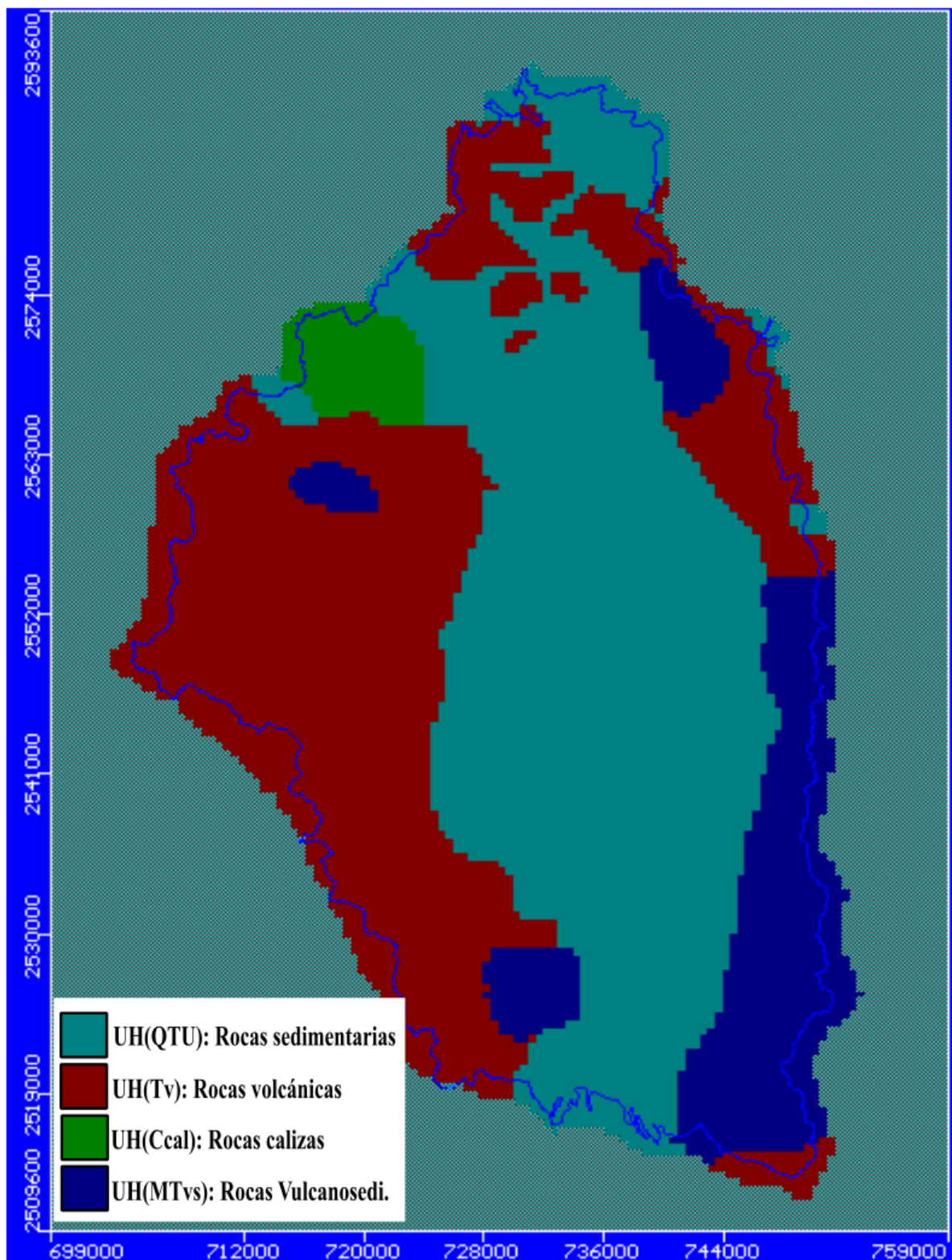


Figura 3.10: Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la zona de estudio (Bottom S1).

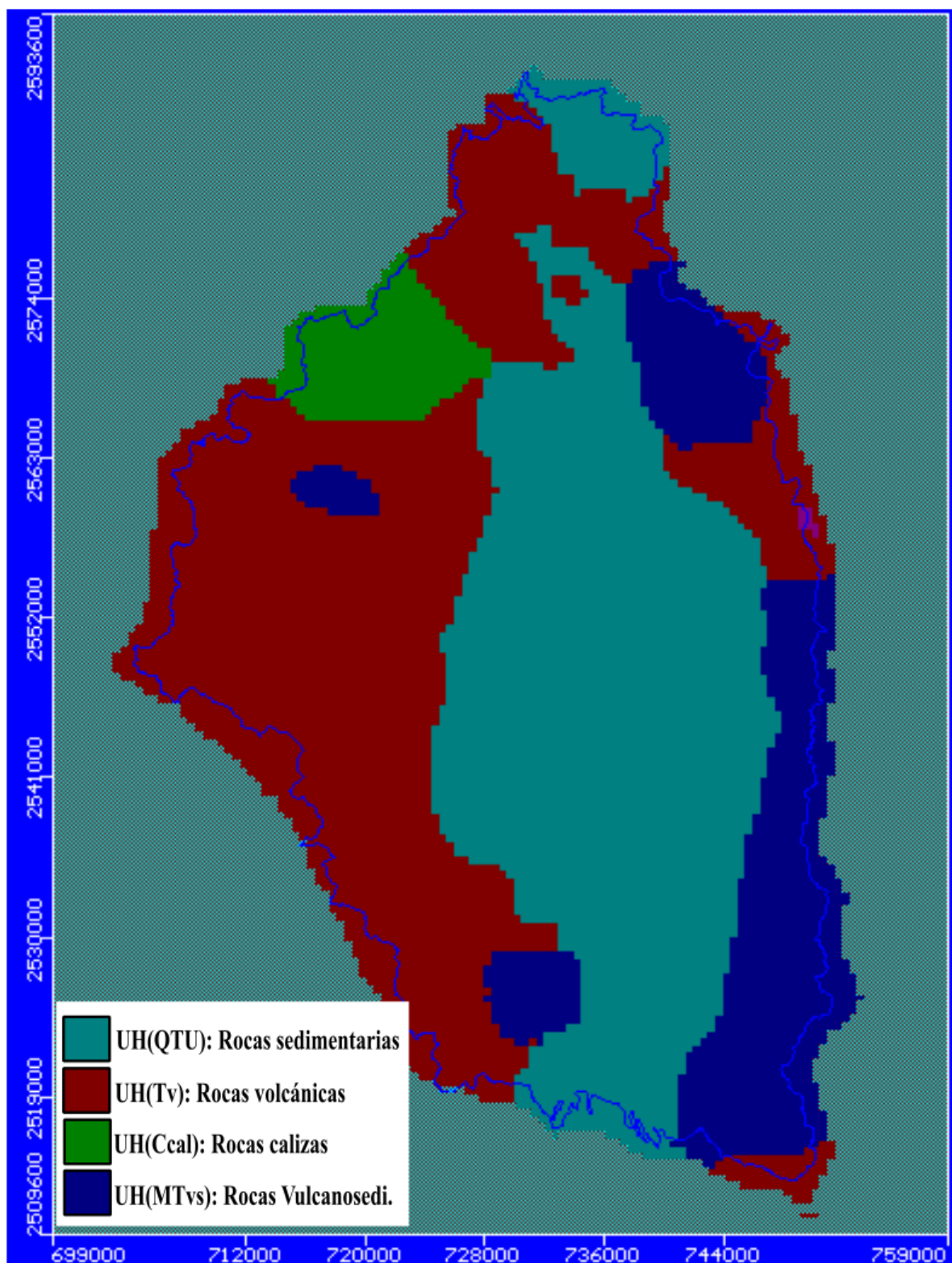


Figura 3.11: Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la zona de estudio (Top S3).

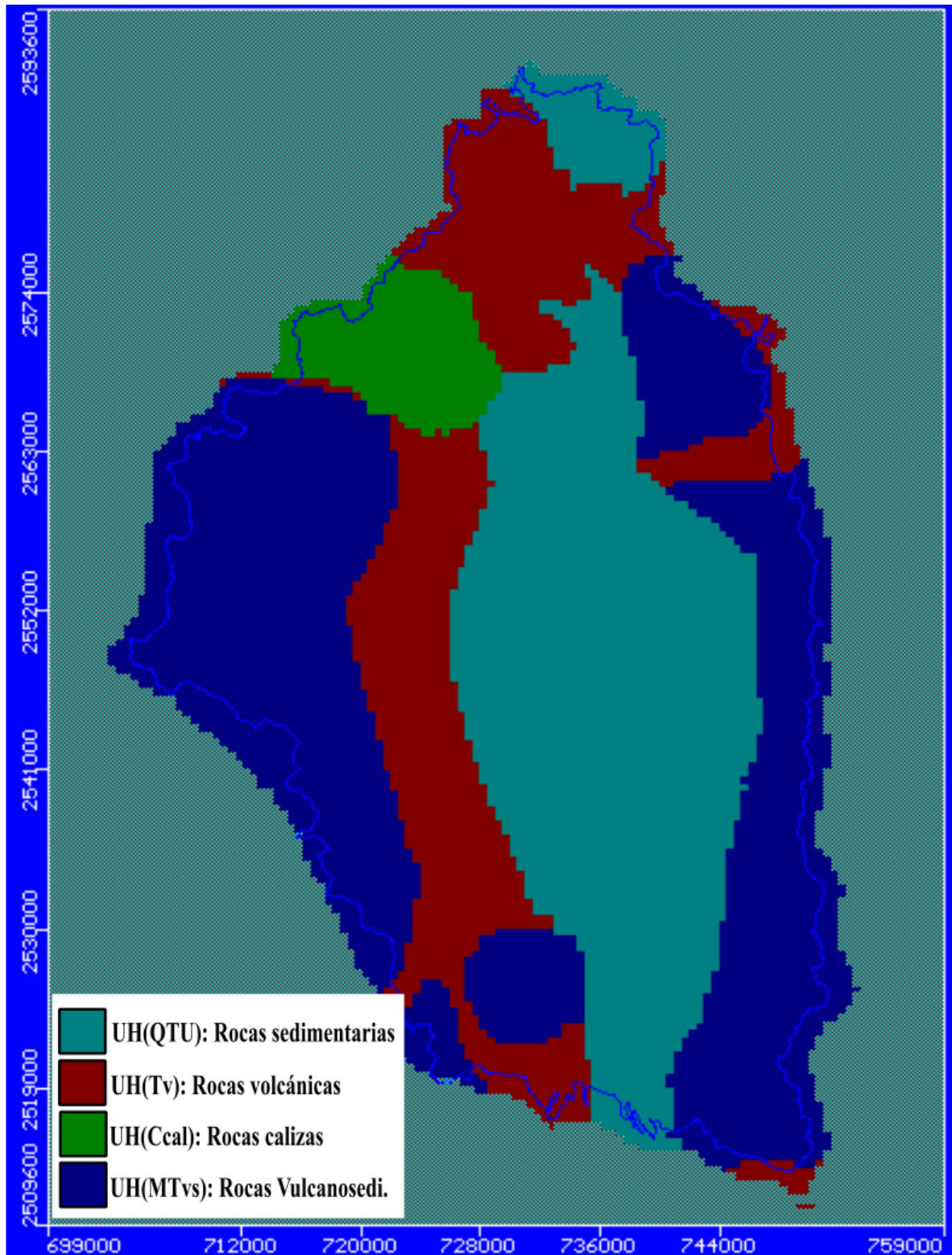


Figura 3.12: Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la zona de estudio (Bottom S3).

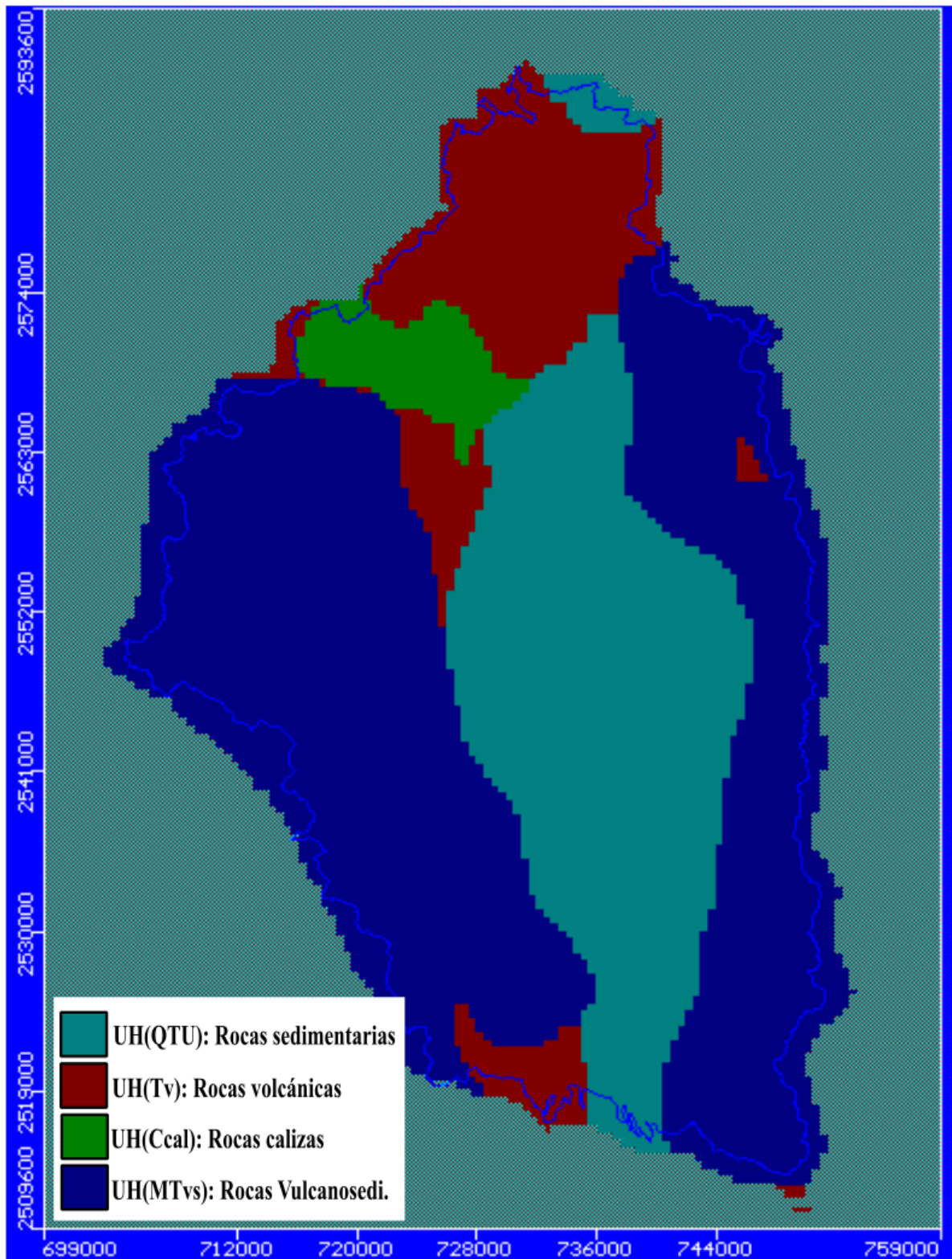


Figura 3.13: Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la zona de estudio (Top S5).

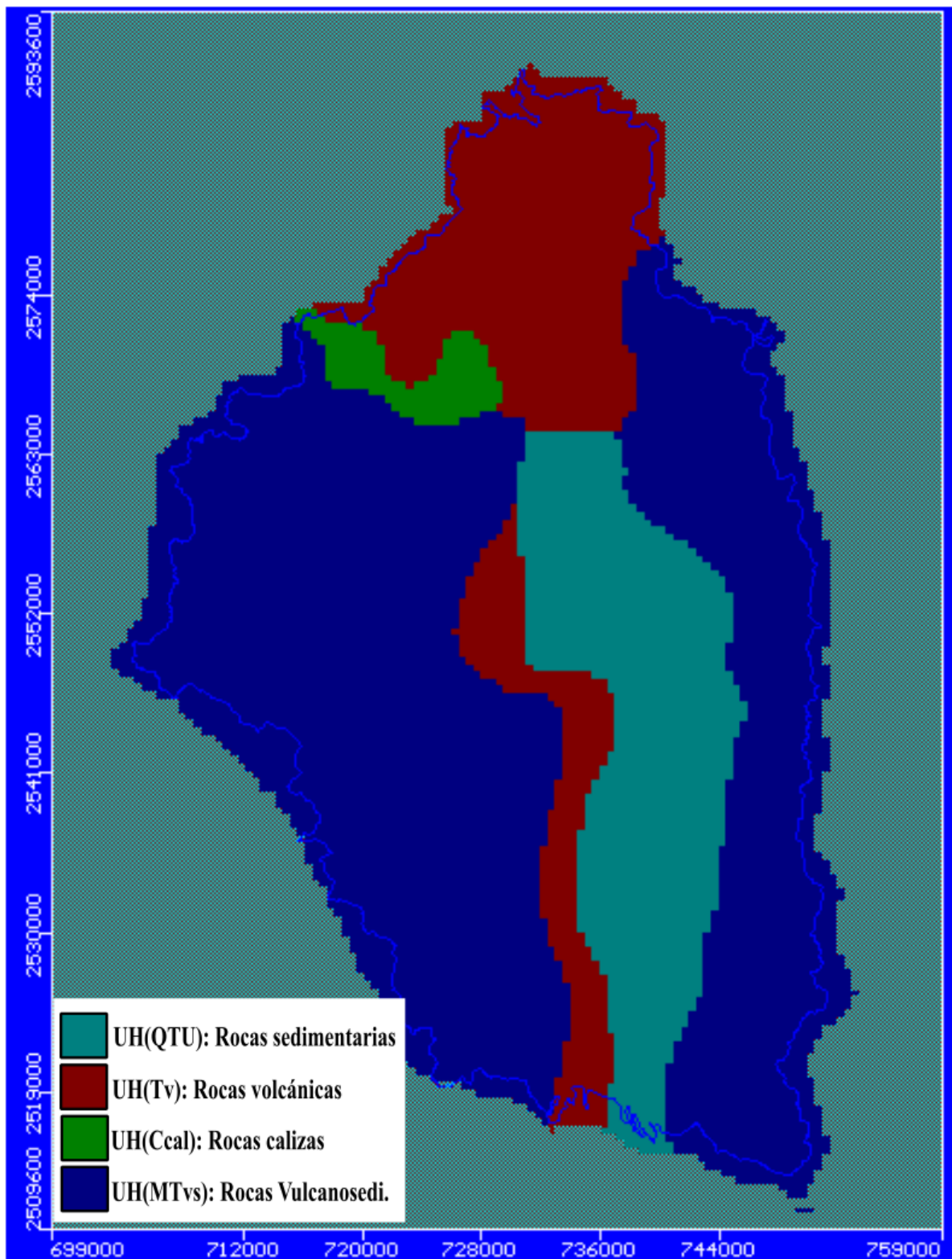


Figura 3.14: Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la zona de estudio (Bottom S5).

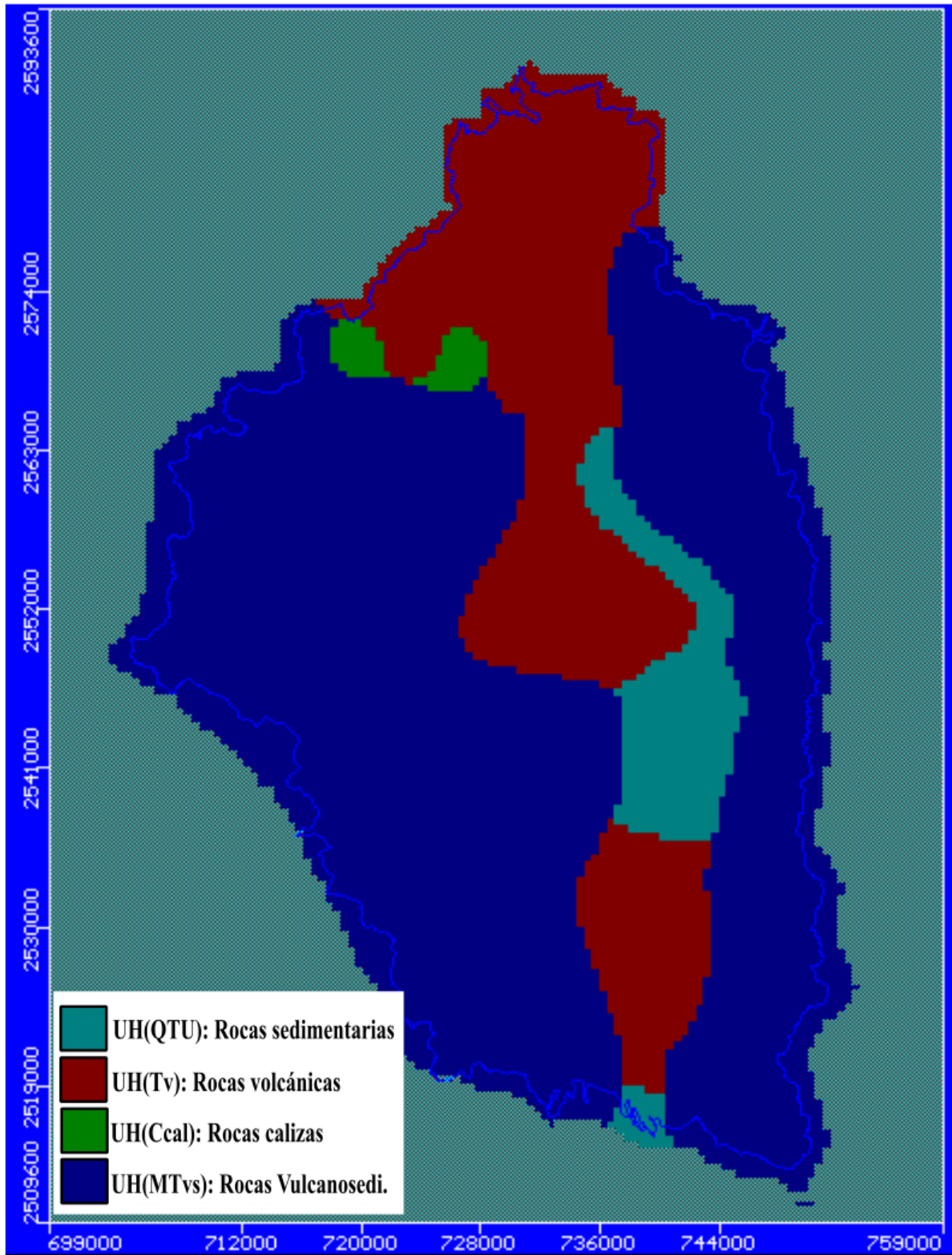


Figura 3.15: Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la zona de estudio (Top S7).

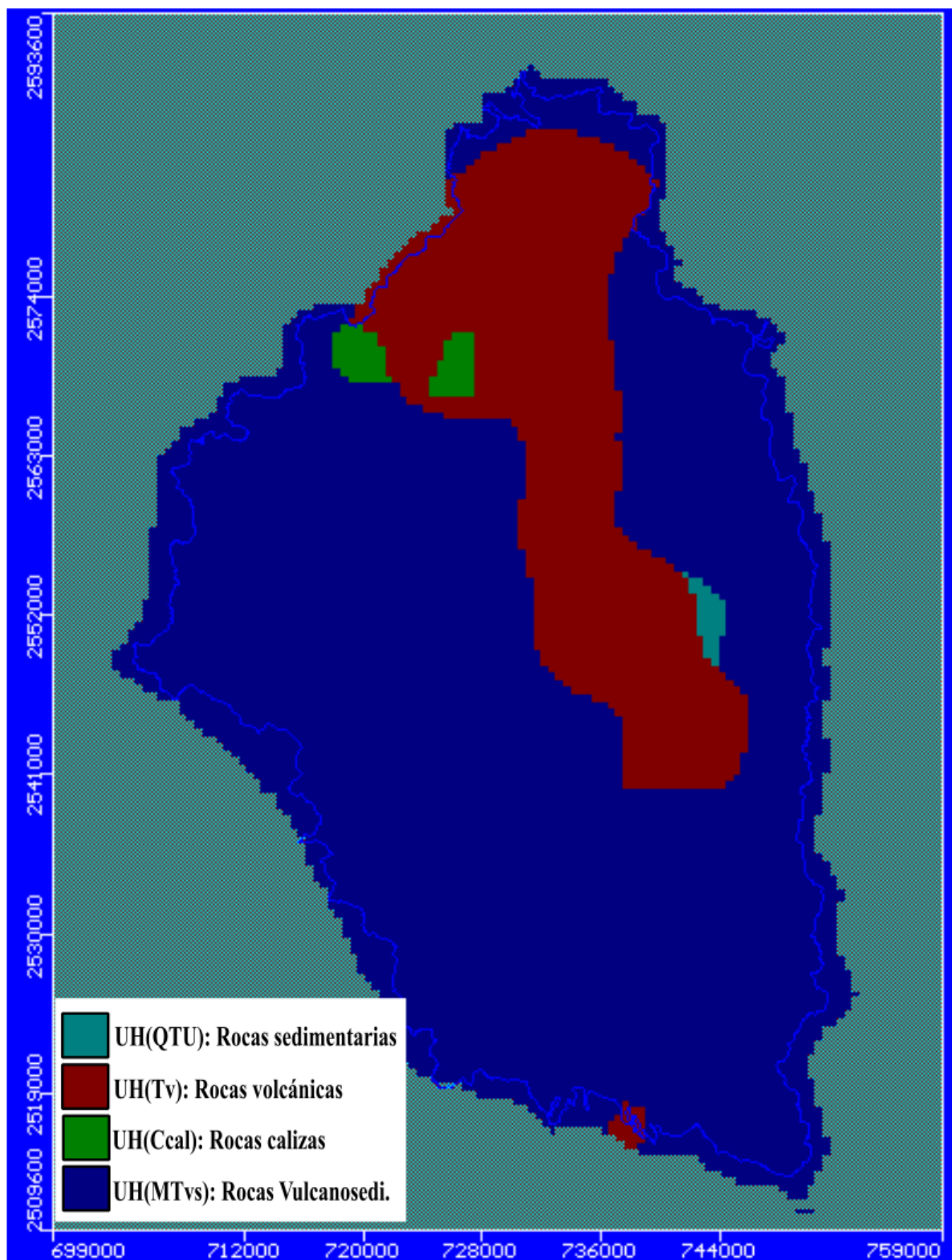


Figura 3.16: Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la zona de estudio (Bottom S7).

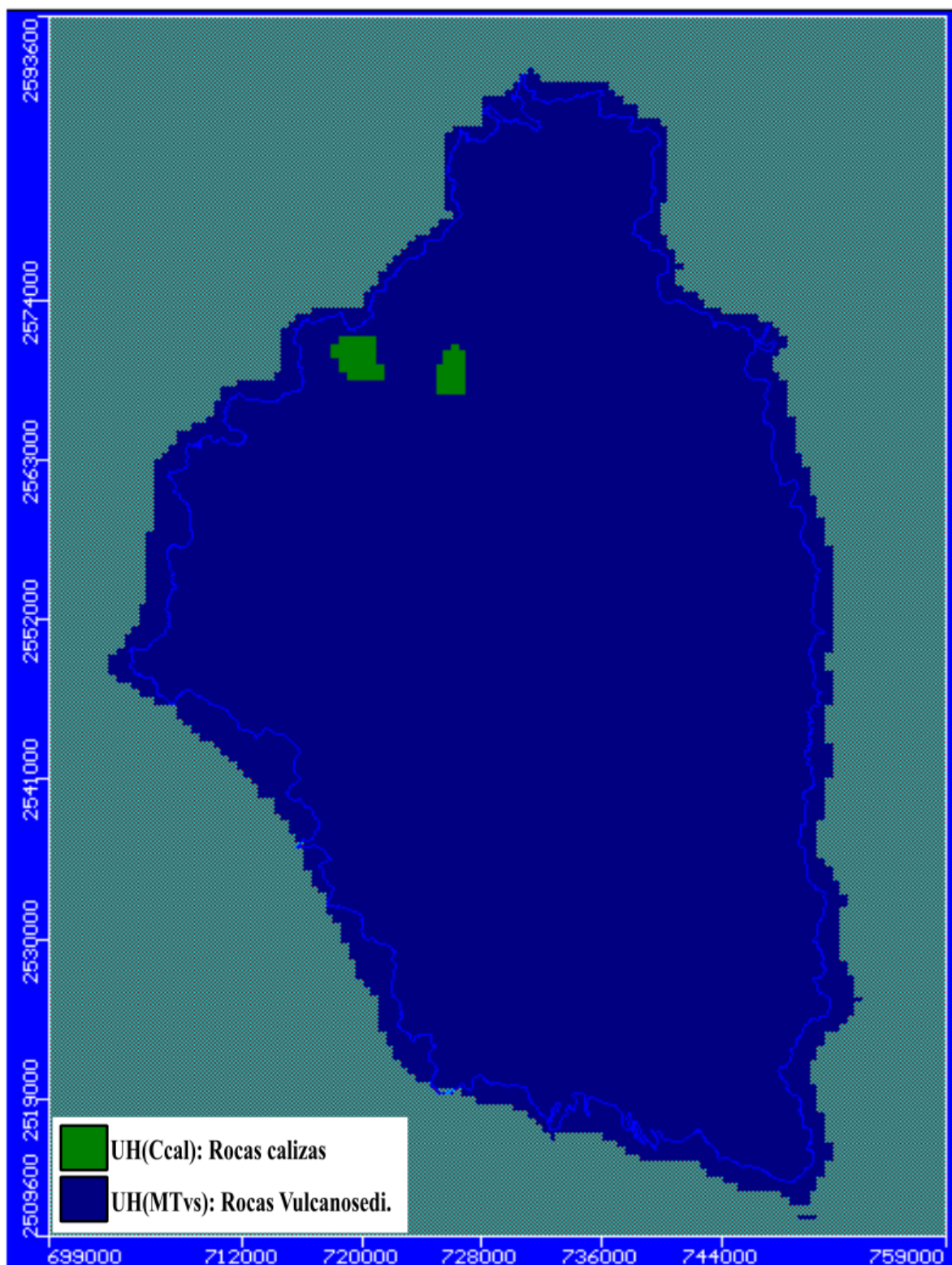


Figura 3.17: Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la zona de estudio (Basamento).

3.3.5. Piezometría histórica

La piezometría histórica se otorgó por la CONAGUA la cual proporcionó registros de los años 1997, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015 y 2017. Estos piezómetros pertenecen a una red de monitoreo gestionada y administrada por la CONAGUA y el Comité Técnico de Agua Subterránea (COTAS) del acuífero administrativo de Calera. 52 pozos de medición son los que se utilizaron para el proceso de calibración del modelo. La tabla 3.3 presenta los valores de profundidad del nivel estático (PNE) y el año que tiene registro de medición, sus coordenadas en sistema UTM Zona 13N. Para conocer la Elevación del nivel estático (ENE) se hizo con referencia al nivel del mar.

Cuadro 3.3: Relación de profundidades del nivel estático medidos en piezómetros de la red de monitoreo de Calera (Parte 1).

Nombre	XUTM	YUTM	1997	2007	2009	2011	2013	2015	2017
N-5	722350.4281	2566447.223	6.19	SD	SD	5.1	4.65	4.3	6.15
N-6	727635.0656	2569112.125	16.72	14	SD	13.64	13.8	14.2	SD
N-6'	729084.6209	2567334.093	25.09	26	SD	SD	SD	SD	SD
SN_1	727421.9808	2567050.085	SD	SD	SD	SD	14.8	SD	SD
SN_2	734491.4476	2567581.434	18.36	24.76	SD	24.95	24.63	25.1	29.22
N-9	726766.7189	2565433.694	SD	SD	SD	SD	15.54	16.55	12.44
N-11	726794.3733	2564738.629	24.93	18.7	SD	18.07	17.1	18.7	SD
N-12	733473.6826	2561912.041	44.67	53.44	63.6	59.22	56.28	58.35	59.82
N-13	740173.8482	2561855.321	25.95	33.72	33.72	32.72	34.69	34.9	35.01
N-14	745804.9972	2562445.661	SD	39.3	30	41.28	41	42.08	43.54
N-16	725781.3421	2556285.186	69	81.2	SD	SD	SD	96.98	98.79
N-19	741341.5691	2557223.831	33.34	38.8	SD	41.63	SD	47.6	SD
N-20	728225.6683	2553180.313	72.58	78.9	98.6	98	100	82.8	SD
N-22	740152.1263	2551689.59	62.64	SD	83	SD	SD	81.97	SD
N-23	745389.3028	2550835.757	55.3	69.3	SD	76.75	81.26	82.35	86
N-24	725838.044	2546666.397	55.18	42.2	SD	43	49.8	SD	SD
N-25	732058.8649	2544305.493	30.57	39.8	43.16	44.15	45	50.28	56.6
N-26	736679.404	2546528.723	45.94	56.22	SD	SD	SD	66.88	SD
N-27	741053.9485	2546610.628	57.9	65.6	61.45	73.25	74.4	76.15	78.5
N-28	746475.0916	2548025.14	78	87.2	SD	SD	SD	97.75	SD
N-29	726058.702	2541653.754	37.9	38.4	SD	39.5	54	SD	SD
N-30 A	734125.9583	2543297.377	36.52	SD	SD	41.6	SD	SD	82.61
N-30 C	734994.1017	2541532.151	41.32	SD	68.15	69.1	71.43	SD	SD
N-31	739935.571	2542607.262	42.37	SD	SD	SD	52.61	51	52.3
N-33	725659.1992	2536936.484	52	54.7	SD	SD	SD	SD	81.48

Cuadro 3.4: Relación de profundidades del nivel estático medidos en piezómetros de la red de monitoreo de Calera (Parte 2).

Nombre	XUTM	YUTM	1997	2007	2009	2011	2013	2015	2017
SUST.	735102.0015	2534064.888	SD	SD	SD	SD	80.9	83.35	83.75
N-35'	737337.2895	2536060.216	52.36	SD	SD	63.8	64.34	65.95	SD
N-37	735770.903	2529933.095	48.1	SD	SD	58.8	61.45	65.15	67.42
SN_3	739406.1088	2533240.049	86.84	97.4	SD	SD	SD	109.25	116.66
SN_4	738287.7338	2524768.541	SD	SD	SD	61.66	61.56	62	SD
N-41	732387.8503	2520864.14	81	91.6	93.47	SD	100	98.85	108.2
N-42	739167.8157	2521061.74	90	93.64	99.88	102.5	108.58	108	114.43
SN_5	734931.7045	2523728.318	SD	SD	SD	SD	48	SD	SD
SN_6	739328.0667	2534925.291	SD	SD	SD	SD	99.95	101.85	107.19
C.P 4	741669.0816	2551221.563	SD	SD	79.66	82.5	85.3	86.8	91.04
SR	741082.8712	2537692.252	SD	SD	SD	90.05	93.8	98.25	SD
SN_7	743570.8122	2548288.561	SD	SD	SD	70.3	71.31	73.6	SD
SN_8	743557.276	2554902.264	SD	SD	SD	61.3	61.85	53.1	SD
SN_9	739107.7046	2559477.662	SD	SD	SD	54.3	61.85	64.45	SD
TCON.	741398.1324	2527950.68	SD	SD	SD	108.5	112	114.35	127.83
N-15	736282.2998	2570173.397	SD	SD	SD	SD	20	23.15	24.17
VIVE.	736794.5103	2548441.674	SD	SD	SD	49.94	51.13	58.7	SD
SN_10	739850.1051	2518333.552	SD	SD	SD	SD	135.24	138.69	SD
SN_11	734796.2727	2527680.664	SD	SD	SD	39.72	30	SD	SD
SN_12	737430.663	2519920.449	SD	SD	SD	101.5	102.15	103.6	112.9
SN_13	738280.3861	2524691.489	SD	SD	SD	61.66	61.56	62.1	63.23
SN_14	738393.2644	2541570.231	SD	SD	SD	37.5	37.6	SD	SD
SN_15	738409.4029	2549529.006	SD	SD	SD	64.38	65.23	81.95	SD
SN_16	736172.3651	2559163.194	SD	SD	SD	63	63.48	68.8	73.3
SN_17	734674.421	2560296.723	SD	SD	SD	66.7	67	70.38	SD
SN_18	736874.6964	2562436.54	SD	SD	SD	46.9	47.2	53.92	52.41
SN_19	731673.4516	2564949.126	SD	SD	SD	56.35	56	40.1	32.24

3.3.6. Pozos de bombeo

Para esta condición de extracción se tomó en consideración los pozos registrados en el REPDA cuyas concesiones más antiguas fueron del año 1994 mientras que las más actuales son las referidas al mes de marzo de 2022.

La mayoría de los pozos con coordenadas incorrectas fueron reubicados dentro del área del municipio a los cuales corresponden, los pozos cuyas coordenadas si correspondieron al municipio registrado pero que no están dentro del área activa del modelo no son tomados en cuenta. Los pozos que se ubican dentro del área activa, pero en zonas poco probables de extracción (sierras, ciudades, zonas de baja conductividad hidráulica, etc.) se mantuvieron en dichas zonas debido a la incertidumbre de su ubicación. Posteriormente estos fueron

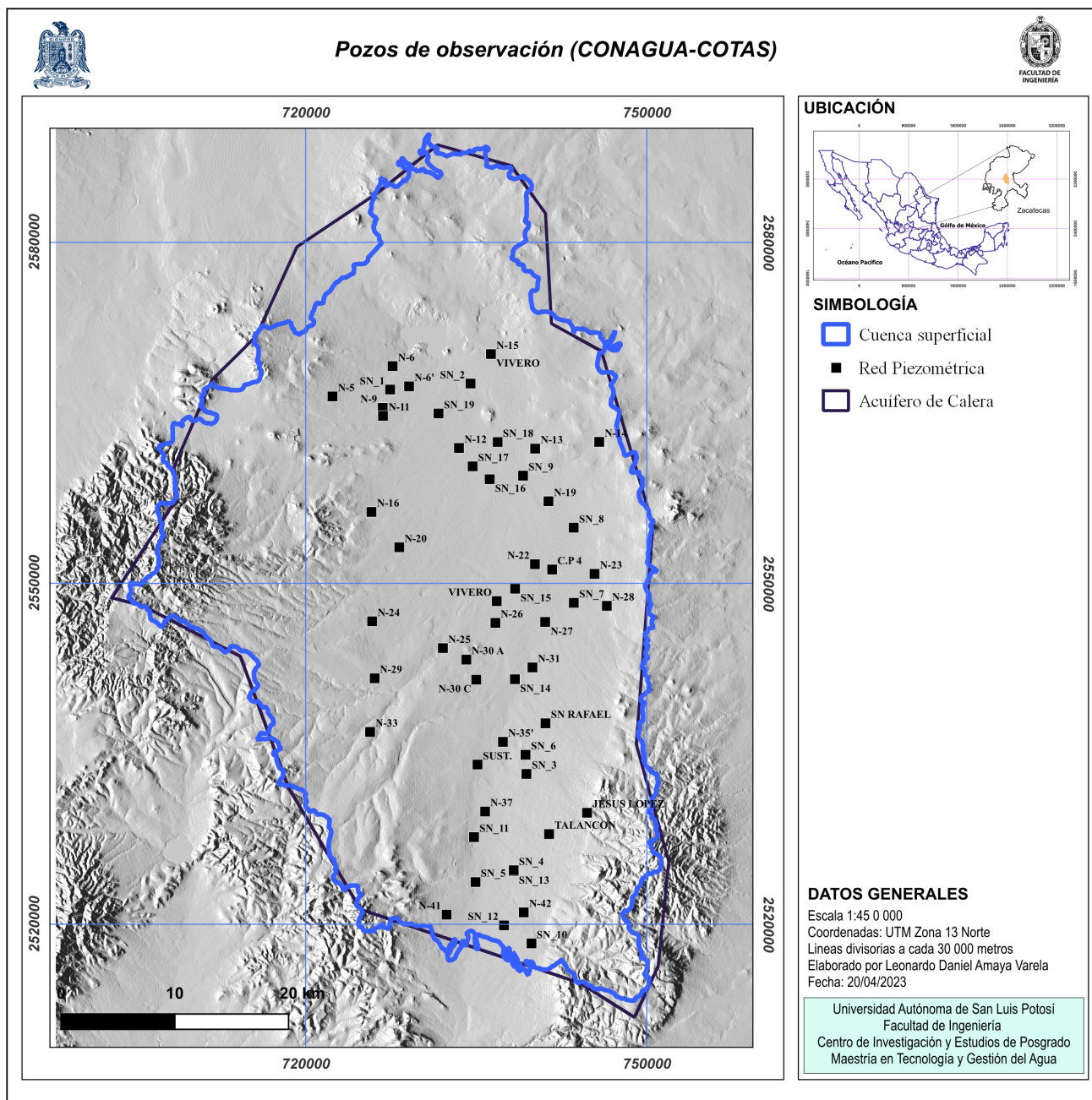


Figura 3.18: Distribución espacial de los pozos de observación (piezómetros) de la red de monitoreo de Calera.

desactivados. El régimen de extracción de cada pozo se estableció de forma individual. Los pozos con uso de abastecimiento público-urbano, industrial y otros usos tienen una extracción continua en todos los días del año, mientras que los pozos de extracción agrícola sólo tienen extracción durante los periodos de riego, es decir, durante ocho meses de cada año ya que debido a la diversidad de cultivos existen dos periodos de riego y dos periodos de cosecha. Para simplificación del modelo los periodos de riego se establecieron continuos. En ambos casos la extracción se indicó en $m^3/\text{día}$ en las propiedades del modelo.

3.3.7. Cargas iniciales

La configuración de las líneas de misma carga piezométrica se realizó utilizando registros de medición del PNE del año 1994 obtenido de Ariel consultores (2004). Este periodo de medición consideró 63 pozos los cuales está esparcidos en toda el área de estudio. La interpolación espacial de los valores se hizo con el método de interpolación Kriging ordinaria hecha dentro del entorno de VMF.

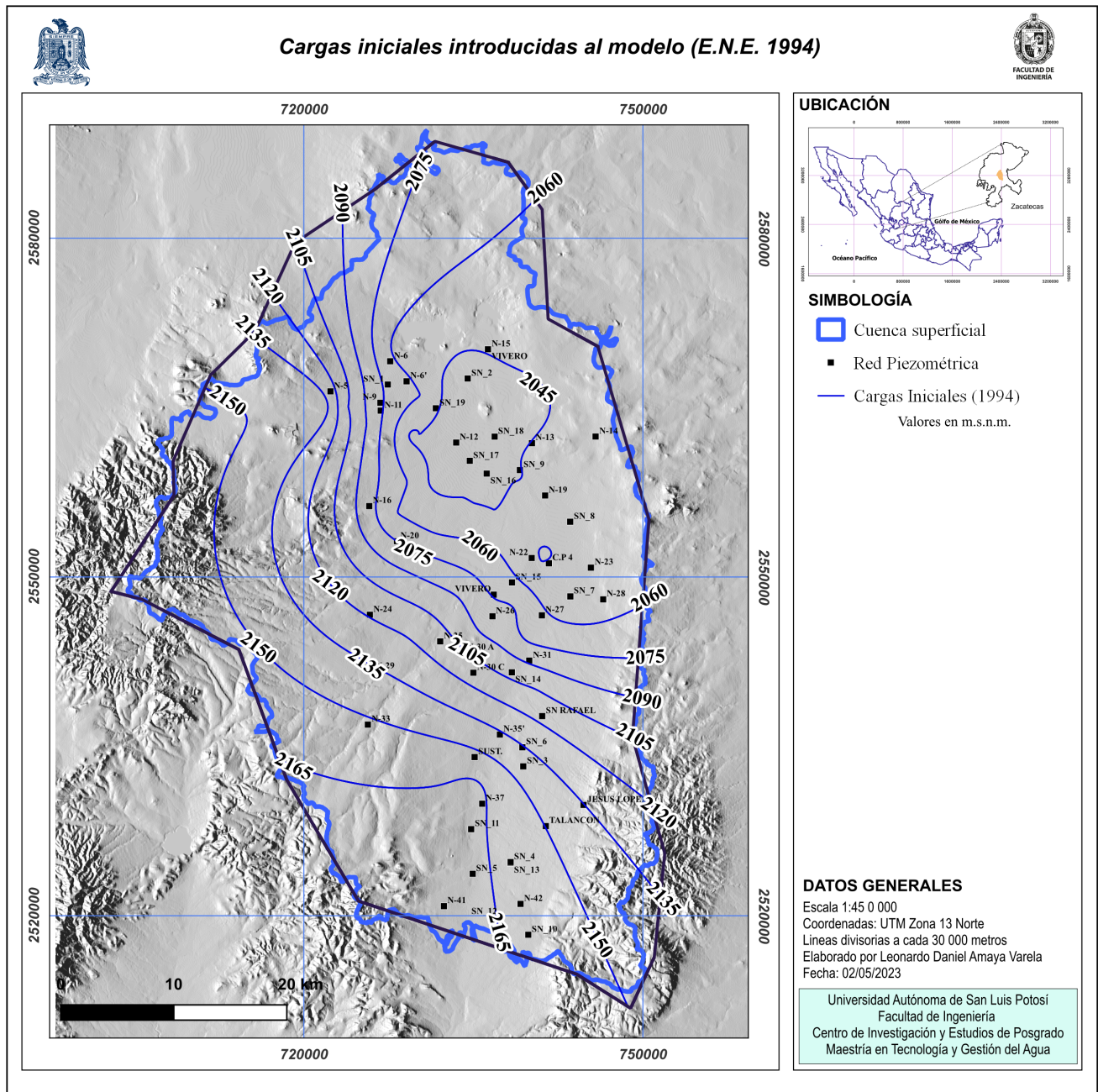


Figura 3.19: Cargas iniciales que corresponden a la elevación del nivel estático (ENE) del año 1994.

3.3.8. Recarga

El establecimiento de las zonas y cantidad de recarga es uno de los procesos más complicados de implementar debido a la incertidumbre de los valores propuestos. Para conocer la cantidad de recarga se hicieron las suposiciones extraídas del conocimiento del modelo conceptual planteadas en el capítulo 2 (subsección recarga vertical natural e inducida de agua en el acuífero). La regionalización de la recarga se hizo tomando en cuenta la geología y el uso de suelo principalmente. Se crearon seis zonas de recarga y una zona de no recarga.

Cuadro 3.5: Valores de recarga vertical (inducida y natural) sobre la superficie del acuífero.

Zona	mm/año	Área(km ²)	m ³ /día	Descripción
1	0.00	149.143	0.00	No recarga
2	15.89	251.534	10950.343	Rocas volcánicas Zona 1
3	8.12	8.385	186.53	Fugas de red
4	4.74	1394.147	18104.813	Zona cultivos
5	12.59	236.96	8165.707	Rocas volcánicas Zona 2
6	0.50	88.332	121.003	Otras zonas
		Suma	37528.403	

En la figura 3.20 se puede apreciar mejor la distribución espacial dada en el modelo numérico, así como las zonas que corresponden a cada una de las cantidades de recarga.

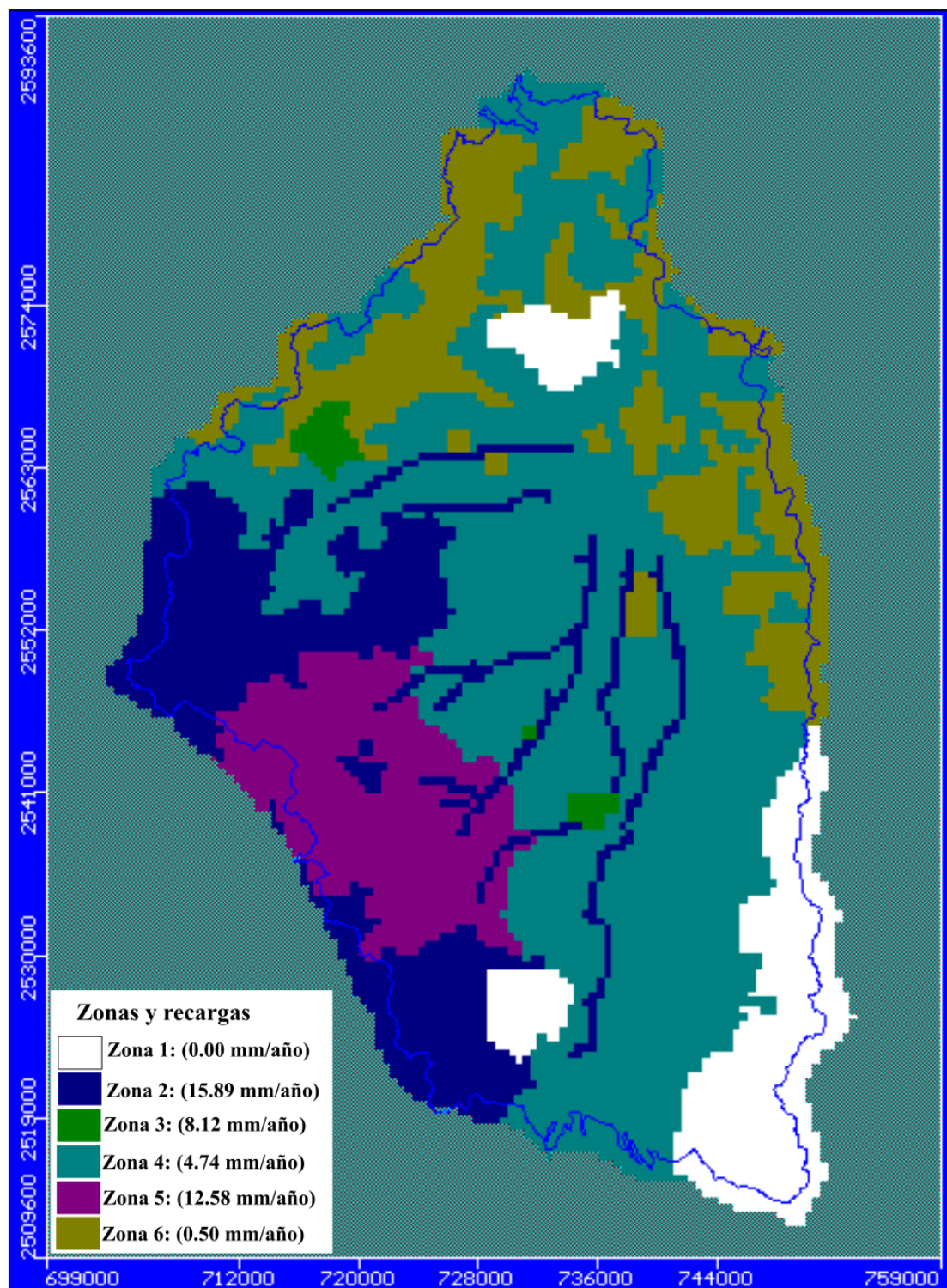


Figura 3.20: Distribución espacial de la recarga en la primera capa del modelo numérico implementado.

3.4. Calibración y validación del modelo numérico

Los sistemas físicos y naturales son complejos de imitar perfectamente mediante la aplicación de un modelo numérico (Anderson y cols., 2015), estos modelos físico-numéricos tienen una gran variedad de simplificaciones lo que nos permite tener un mayor control sobre las variables importantes. Para poder comparar que tanto se asemejan los resultados de la modelación con los valores medidos en la realidad se comparan y se ajustan los parámetros para que la diferencia entre estos sea cada vez menor. Para ello se llevó a cabo el proceso de calibración.

La calibración de cualquier modelo exige experiencia y conocimiento del sitio por parte del modelador. La calibración ayudó a evaluar las características propuestas inicialmente, así como la diferencia con la realidad buscando que sea cada vez menor. Durante el proceso se debe cuidar que las suposiciones hechas estén bien fundamentadas en el modelo conceptual. Un modelo numérico de agua subterránea siempre estará sujeto a errores, entendiendo error a la diferencia de lo simulado numéricamente con la realidad (Anderson y cols., 2015) un modelo jamás será una representación exacta de la realidad a pesar de que numéricamente los errores sean mínimos.

En la modelación de flujo se comparan los valores de las cargas piezométricas simuladas en un tiempo determinado y las observadas históricamente en la realidad, se ajustan los parámetros iniciales (como conductividades, coeficientes de almacenamiento y rendimientos) y se visualiza que piezómetros tienen la mejor representación. Además, que se debe considerar el balance de agua que ingresa y sale del modelo, este último también se debe comparar con los calculados mediante diferentes métodos.

Existen dos formas generales de calibración, una manual que se compone de ir ajustando los valores a partir de la experiencia y conocimiento del sitio, y la segunda automática aplicando un algoritmo de simulación inversa. Para el caso de este modelo se optó por usar la calibración manual. Este método se conoce por ser un método laborioso e intensivo, frustrante y subjetivo (Anderson y cols., 2015) sin embargo es el más ampliamente aceptado ya que conserva una estrecha relación con lo propuesto en los modelos conceptuales de agua subterránea.

3.4.1. Calibración del modelo (Estado Transitorio)

Existen dos esquemas generales de calibración, uno en estado estacionario que no toma en consideración los cambios en el almacenamiento ni los efectuados en el tiempo, simplemente reconoce la existencia de entradas y salidas en un periodo único. En este proceso se trata de resolver la ecuación de Laplace (Ecuación 3.2) generalidad de la ecuación de balance de agua subterránea (Ecuación 3.1). Este tipo de simulación está alejada de la realidad en mayor medida que si tomamos en consideración los cambios del almacenamiento en el tiempo. El otro esquema de calibración consiste en hacer simulaciones con variaciones en el tiempo de la extracción de agua mediante pozos y la recarga, es el proceso que más se asemeja a la realidad ya que puede considerar varios periodos de medición del nivel estático, cambios en las tasas de recarga y extracción y así mismo el cambio en el almacenamiento.

Para el caso de este modelo se hicieron las simulaciones en estado transitorio tomando en cuenta siete periodos de mediciones del nivel estático, la primera del octubre de 1997, la siguientes de marzo de 2007, julio de 2009, febrero de 2011, marzo de 2013, enero de 2015 y noviembre de 2017. Como el día de medición no se conoce, se propone que las mediciones se hicieron el primer día de cada mes. A esta fecha de medición se le asignó un día dentro de la discretización temporal, día 1096 para las mediciones del primero de octubre de 1997; el día 4534 corresponde a las del año 2007; 5387 para el año 2009; 5967 en el 2011; para el año 2013 el día es el 5967; 2013 día 6726; 2015 día 7398 y el día 8432 para el año 2017.

Para conocer el error entre los valores medidos y los observados, VMF calcula diversos errores numéricos que deben ser tomados en consideración: El error estandarizado de estimación (SEE por sus siglas en inglés) indica en promedio de diferencia entre los valores (en metros); El otro es la raíz cuadrada media; la raíz cuadrada media normalizada (NRMS por sus siglas en inglés) en porcentaje y el coeficiente de correlación. Principalmente se toma en cuenta la raíz cuadrada media normalizada para poder establecer en que tanto porcentaje nuestro modelo representa la realidad histórica. Aunque no hay un consenso donde se dicte que un modelo tiene una buena o mala calibración, por costumbre se espera que los resultados de un modelo estén acordes cuando menos en un 80 % (Anderson y cols., 2015), es decir que el error medido entre los resultados y lo observado sea menor al 20 %. En este modelo se buscó que esté dentro del 90 % de similitud.

Durante el proceso de calibración se observaron pozos que no tenían semejanza con lo observado en los piezómetros aledaños por lo que se supuso son pozos de observación con condiciones locales particulares y no tienen que ver con el desarrollo regional del modelo. Estos pozos no suelen calibrarse a pesar de que sus contiguos si, por ello se optó por desactivarlos. Estos pozos fueron el SN14 y JL. Para calibrar los pozos restantes se cambiaron valores de conductividad hidráulica en las UH críticas (la UH QTU y la UH Tv). También se desactivaron los pozos de extracción ubicados fuera de la zona activa y pozos cuyas coordenadas estuvieran dentro de la Sierras debido a que es una zona de baja conductividad hidráulica y el rendimiento exigido no tiene sentido con lo establecido en el modelo conceptual. Como se había mencionado anteriormente el proceso de calibración también requiere que exista semejanza en los balances de agua, es decir que el modelo sea capaz de simular la cantidad de agua de recarga que se espera y la cantidad de agua que se extrae en un tiempo y espacio determinado. A continuación, se muestran las gráficas de las calibraciones finales para cada uno de los años puntualizando los errores normalizados (NRMS) y los errores estadarizados de estimación (SEE).

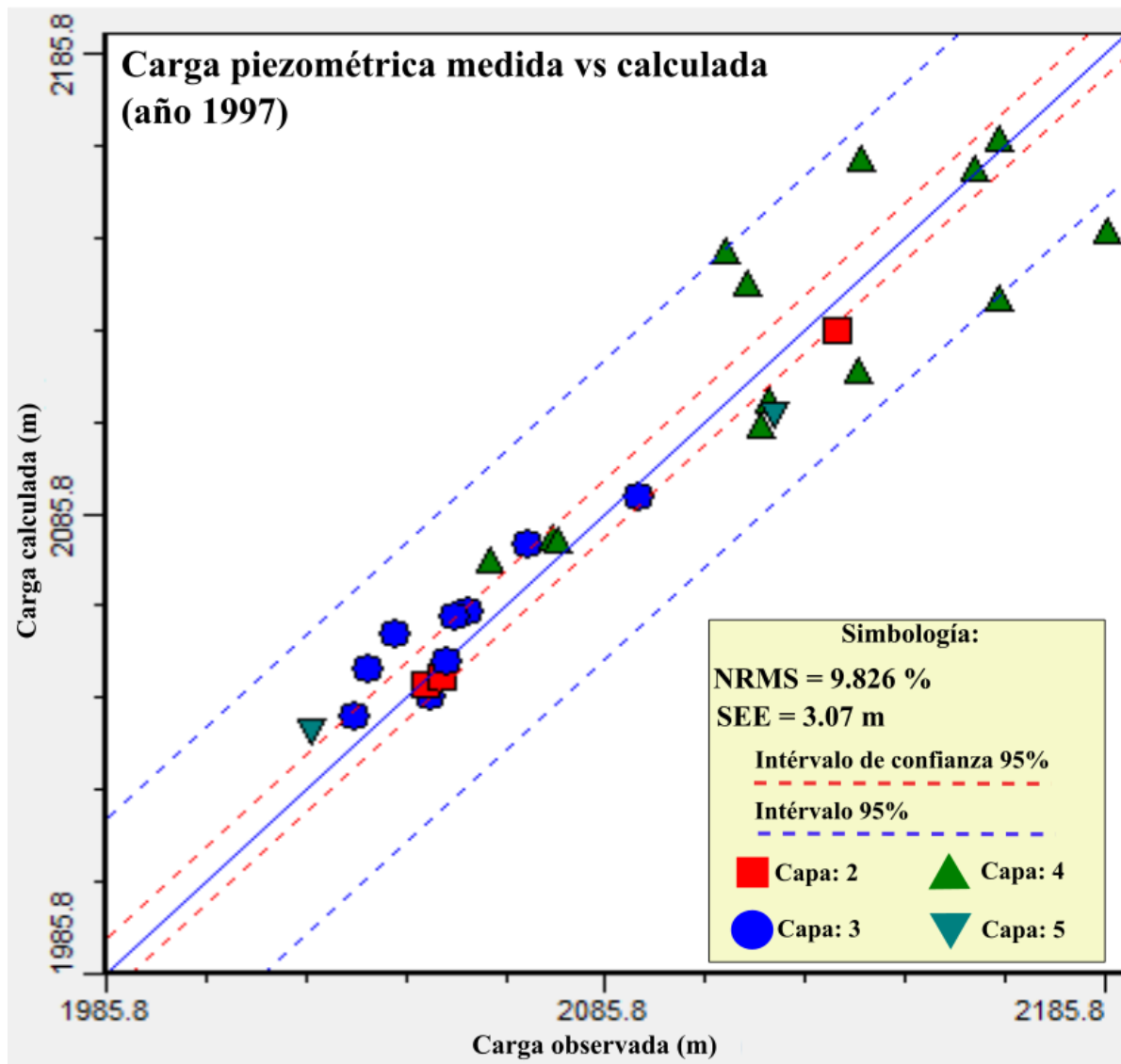
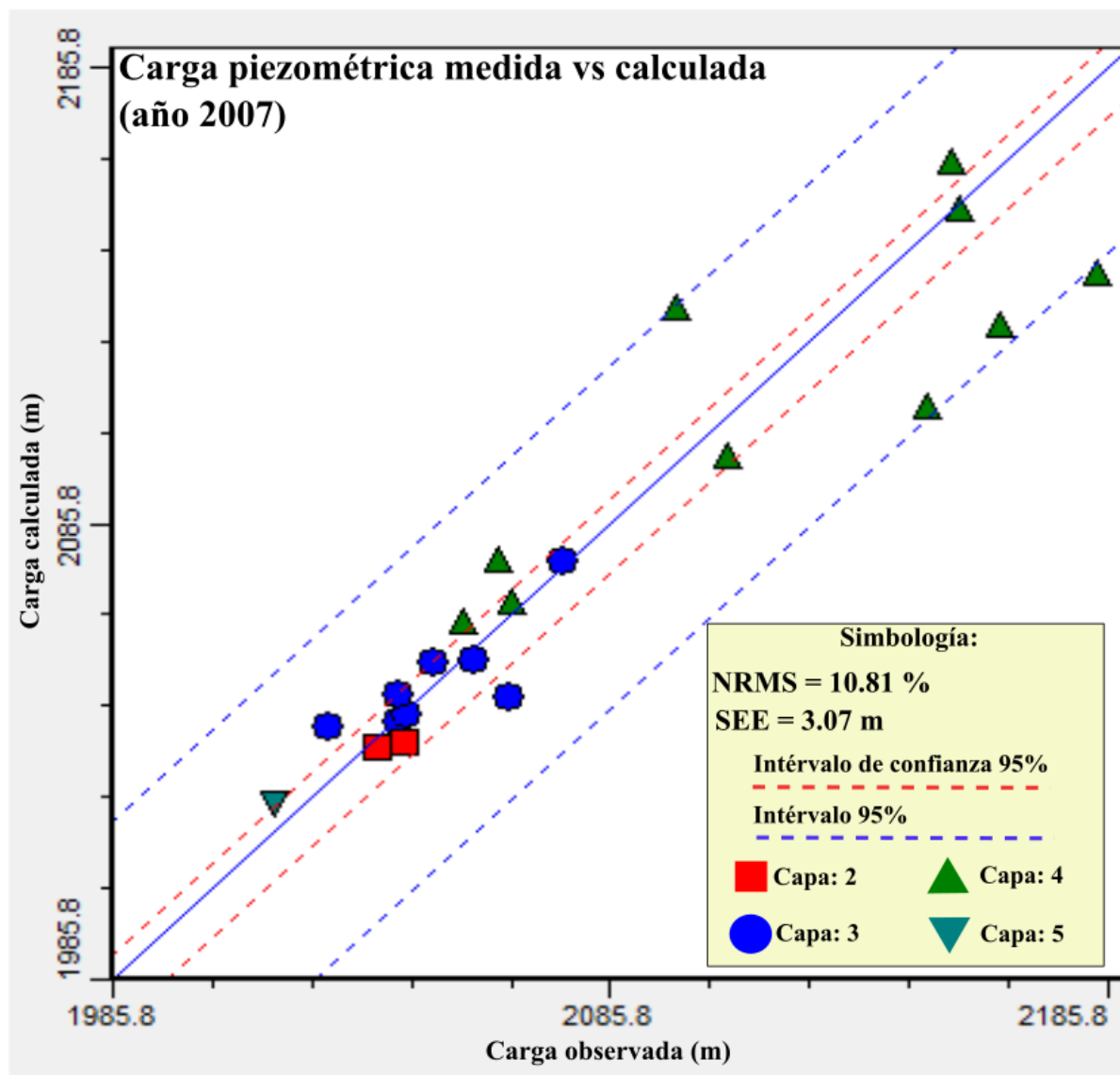
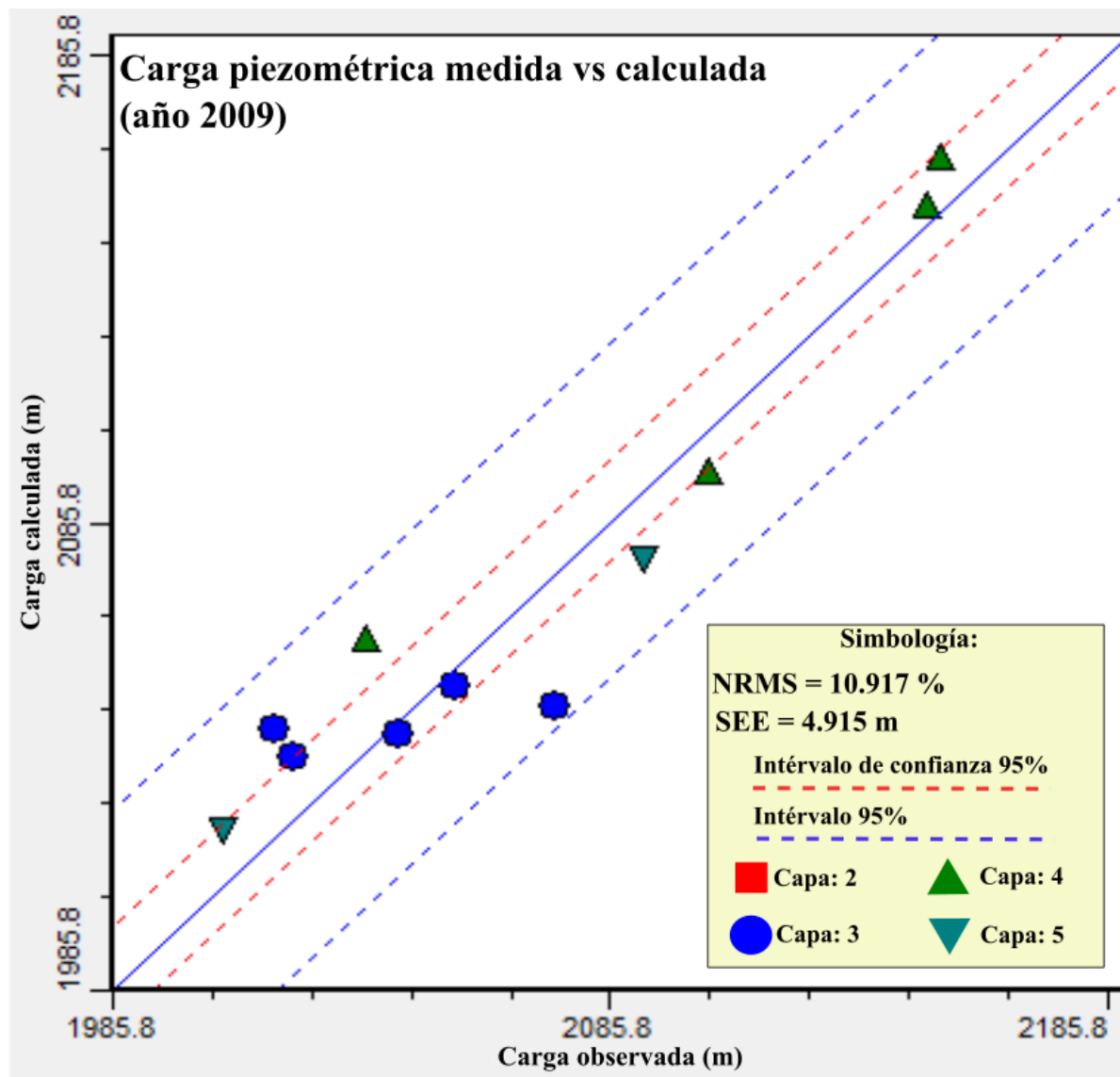


Figura 3.21: Calibración en estado transitorio para el día de medición 1096.





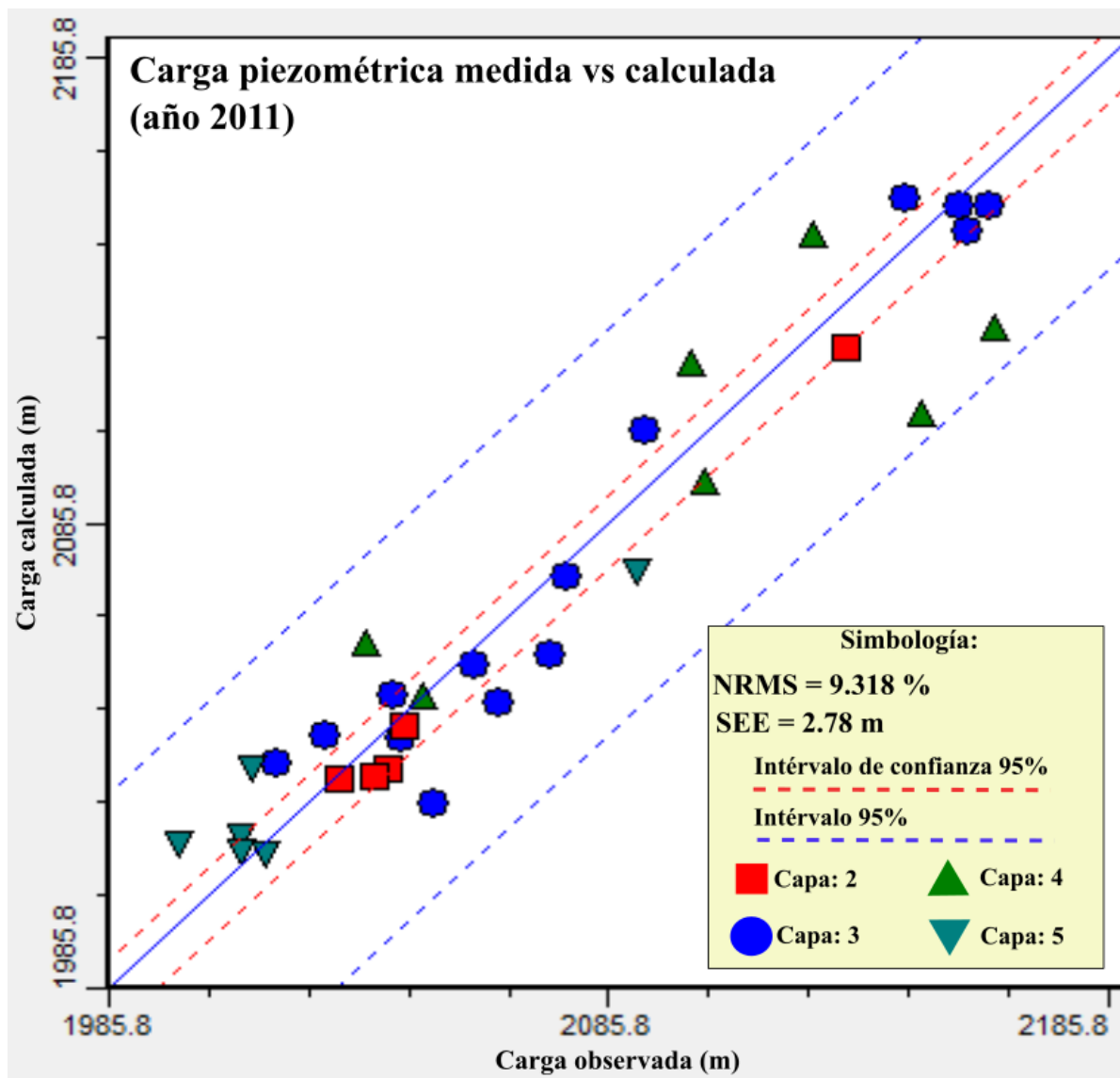


Figura 3.24: Calibración en estado transitorio para el día de medición 5967.

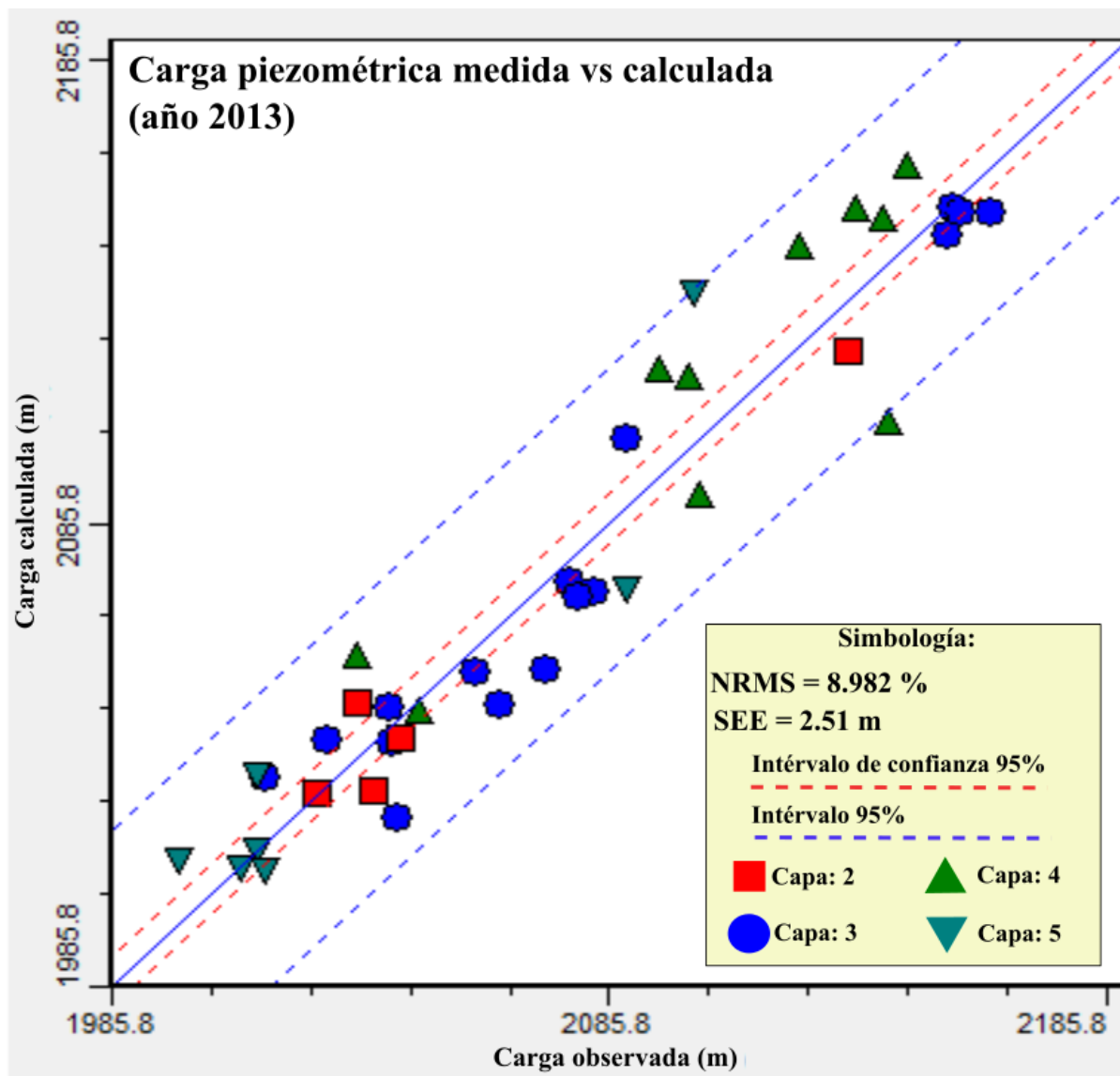


Figura 3.25: Calibración en estado transitorio para el día de medición 6726.

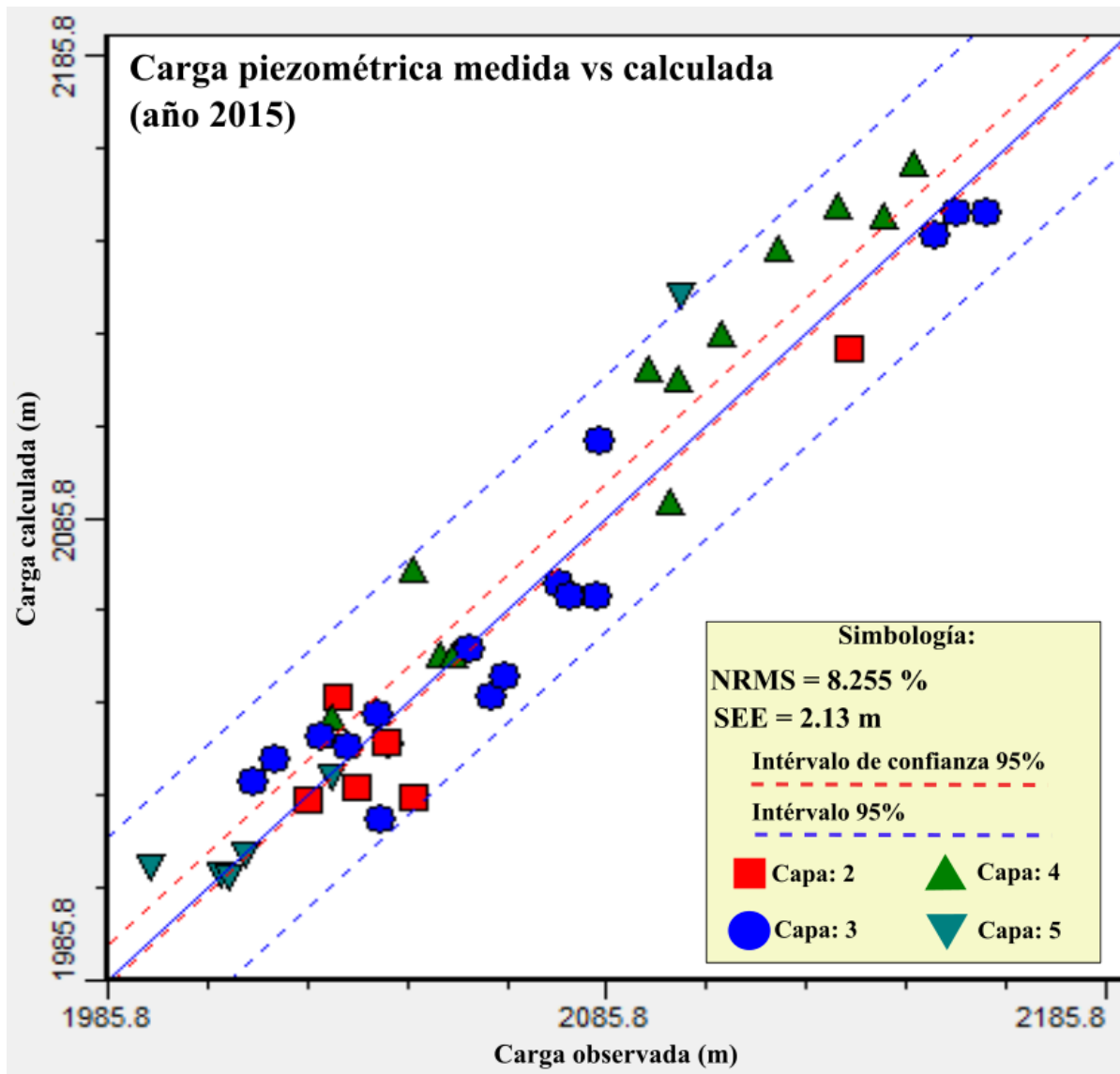


Figura 3.26: Calibración en estado transitorio para el día de medición 7398.

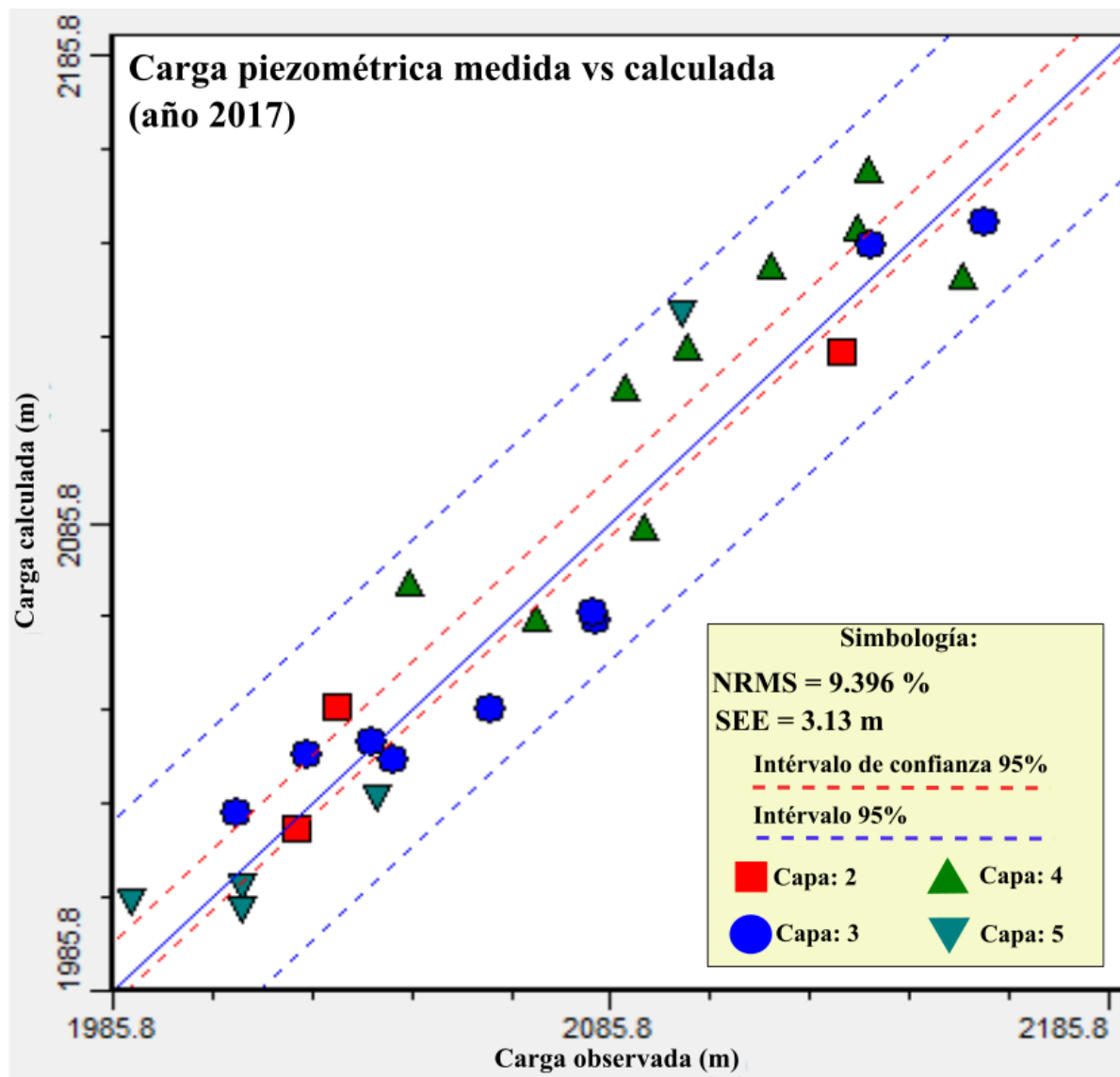


Figura 3.27: Calibración en estado transitorio para el día de medición 8432.

En el cuadro 3.6 se organizan los valores calibrados finales para las diversas propiedades hidráulicas de las unidades hidroestatigráficas.

Cuadro 3.6: Propiedades hidráulicas del medio geológico calibradas.

HU	Kx	Ky	Kz	Ss	Sy	ne	nt
QTU	6.1965E-06	6.1965E-06	6.1965E-07	8.352E-5	0.088	0.20	0.30
Tv	1.0890E-05	1.0890E-05	9.9000E-04	8.352E-5	0.132	0.15	0.30
Ccal	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	8.352E-6	0.022	0.15	0.3
TMvs	1.01E-09	1.01E-09	1.01E-10	8.352E-6	0.022	0.15	0.3

La verificación del balance muestra que lo simulado contra lo calculado en el modelo conceptual difiere en promedio en un 1.06 veces en la extracción y un 0.89 veces en la recarga vertical. En el cuadro 3.7 se enuncian estos resultados. (Donde Ext = Extracción de agua mediante pozos, R.V. =Recarga vertical total, Bal = Balance y VMF = el valor simulado mediante Visual Modflow).

Cuadro 3.7: Comparación entre valores dados en el balance del modelo conceptual y lo simulado por VMF para valores de extracción y recarga.

Año	Balance Ext (hm^3)	Balance Recarga(hm^3)	VMF Ext (hm^3)	VMF Recarga(hm^3)	Diferencia Bal/VMF	Diferencia Bal/VMF
1997	45.684	41.131	59.074	46.194	0.773	0.89
2007	994.439	170.154	945.866	192.403	1.051	0.884
2009	1273.541	202.166	1216.03	227.09	1.047	0.89
2011	1466.718	223.932	1379.756	251.493	1.063	0.89
2013	1720.826	252.416	1625.972	283.483	1.058	0.89
2015	1949.057	277.635	1833.666	311.807	1.063	0.89
2017	2309.662	316.439	2186.213	355.387	1.056	0.89

3.4.2. Validación y análisis de sensibilidad

Para poder conocer la capacidad del modelo para simular de forma correcta las cargas piezométricas en el espacio y tiempo se hace uso de la herramienta de validación. La validación consiste en conocer las cargas hidráulicas a partir de los valores calibrados, es decir, realizar una simulación y comparar el resultado con lo medido en campo en una fecha determinada. En este modelo se hizo uso de las mediciones realizadas en abril-junio del año 2022.

En ese periodo de verificación de pozos se midieron valores de profundidad del nivel estático y dinámico. De los 32 pozos visitados sólo en ocho de ellos se pudo obtener información de la profundidad a nivel estático. El resto de los pozos no tenían información actualizada a la fecha (red de monitoreo del Comité de Agua Subterránea de Calera), otros pozos estaban secos, sin posibilidad de ingresar la sonda de medición y otros pozos tapados mediante placas de concreto o acero. La validación del modelo se realizó con estos ocho pozos distribuidos en

una buena parte del acuífero. La figura 3.28 representa los resultados obtenidos para el año 2022.

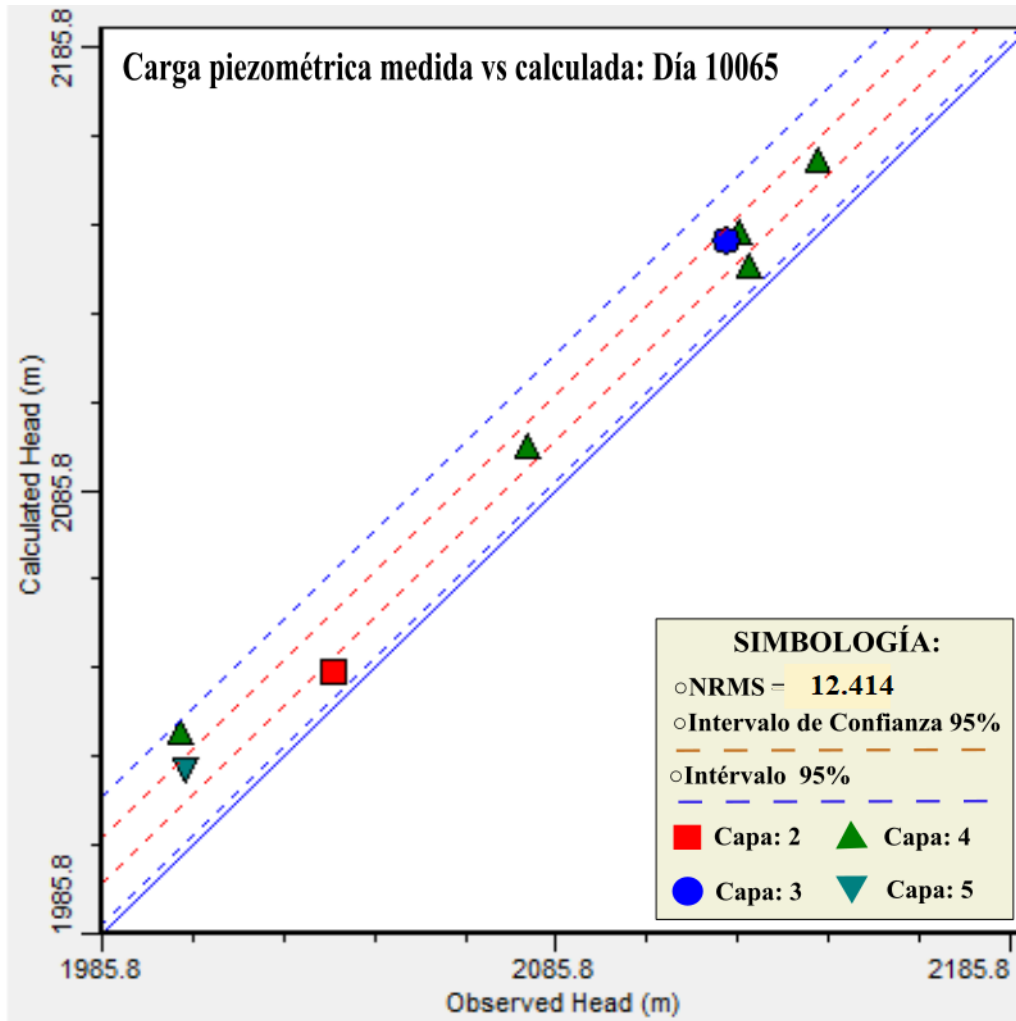


Figura 3.28: Validación del modelo mediante mediciones del nivel estático realizadas a mediados del año 2022.

Como la cantidad de pozos de medición es muy bajo este proceso de validación no representa de una forma correcta la distribución espacio temporal de las cargas piezométricas, sin embargo, a pesar de tener un error normalizado alto (12.414 %) es un buen acercamiento.

Otro de los procesos de verificación es el análisis de sensibilidad. Este tipo de análisis consiste en modificar los parámetros del modelo en un porcentaje dado (principalmente las características hidráulicas del medio geológico) y ver que los cambios afecten en la calibración. Este tipo de pruebas nos ayuda a observar a qué parámetro es más sensible nuestro modelo.

Así se modificaron los valores hidráulicos de conductividad hidráulica (k_x , K_y , K_z), el rendimiento específico (S_y) y el almacenamiento (S_s) en un 25, 50 y 75 por ciento. Como

se observa en la gráfica de Validación el parámetro que más influye en la calibración es el rendimiento específico, seguido de la conductividad hidráulica y finalmente el parámetro que menos afecta al modelo es el almacenamiento (S_s).

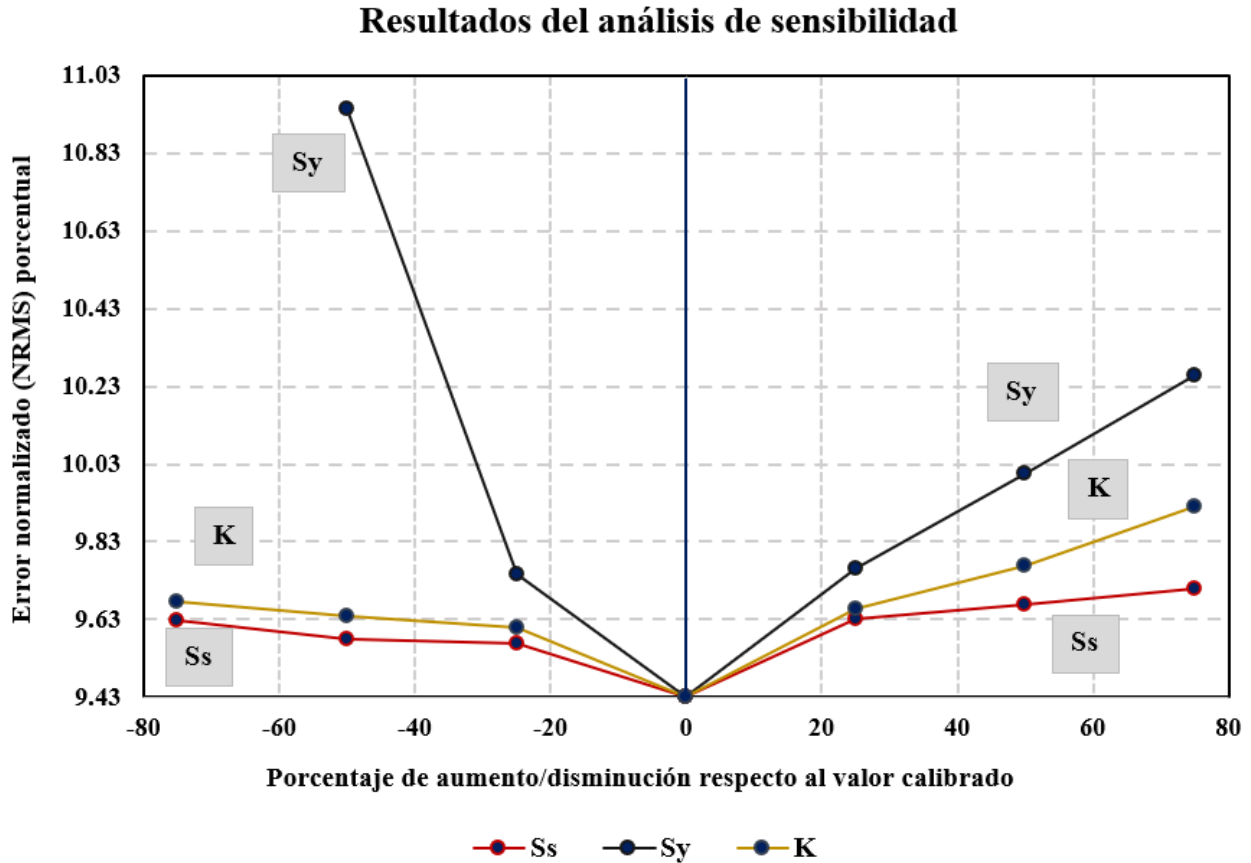


Figura 3.29: Resultados del análisis de sensibilidad del modelo para diferentes parámetros considerados.

3.4.3. Resumen y discusión de la implementación del modelo numérico de flujo

El programa de cómputo utilizado para esta investigación fue *Visual Modflow* 2009 cuyo código de solución está basado en el método de diferencias finitas. Al igual que este modelo, este mismo *software* fue utilizado en (IGH, 2011) y el código de solución (Modflow 2000) fue implementado en (Hernández y cols., 2012) por lo que el modelo en cuestión será el tercer modelo basado en este sistema de cómputo, a diferencia del modelo de Krienen (2018) y Padilla (2023) se implementaron en *FEFLOW* cuya manera de solución de la ecuación general de flujo es mediante el método de elemento finito. Ambos sistemas de modelación tienen tanto ventajas como desventajas, por ejemplo VMF tiene una curva de aprendizaje más rápida y es el más ampliamente aceptado, sin embargo, la refinación es muy simple y trabaja

principalmente con valores promedios anuales lo que obliga a simplificar mucho el modelo conceptual, por otro lado, FEFLOW tiene una mejor capacidad de refinamiento permitiendo hacer refinaciones puntuales en pozos o condiciones (como fallas geológicas) sin embargo la interfaz de usuario (aunque visualmente es mejor que VMF) es más compleja a la hora de conocer los resultados de las modelaciones (Noriega, Álvarez, y Álvarez, s.f.).

El modelo que se elaboró en esta investigación se discretizó en celdas de 500 x 500 metros en nueve capas de espesores variables como lo realizado en (Hernández y cols., 2012), a diferencia del modelo de la empresa Ingeniería y Gestión Hídrica que implementó su modelo con celdas de 1000 x 1000 metros en cuatro capas. En el caso de Krienen (2018) donde la malla se concretó mediante una discretización triangular distribuidas en 20 capas generando más de un millón de celdas triangulares. El modelo de tratado en este estudio tuvo la mayor área de discretización que los modelos anteriores (5400 km^2), no obstante, el modelo de Krienen presentó el mayor número de nodos analizados. Temporalmente los modelos del 2010 y 2011 tuvieron como fecha inicial el año 1955 con 14235 y 18250 días de simulación respectivamente. El modelo de 2018 (Krienen) es el que menor cantidad de días de simulación presenta con 6608 días en contra posición con el modelo 2023 que contó con una simulación de 10064 días ya que se tomó como fecha inicial el mes de octubre de 1994.

Como parte de la implementación se utilizaron 8 secciones geológicas para este modelo (2023) involucrando las dos secciones utilizadas por Krienen haciendo la interpolación de las formaciones geológicas de manera manual. Los modelos del 2010 y 2011 no puntualizaron el uso de secciones para la creación de dichos modelos. Krienen interpretó la distribución de las unidades hidroestatigráficas utilizando *GeoModeler* generando un modelo tridimensional que posteriormente discretizó. Visual Modflow en la versión empleada (2009) no permite la importación de modelos tridimensionales de otras plataformas. Tanto este modelo como el de Krienen se tomaron en consideración los valores de las propiedades hidráulicas del modelo de la empresa IGH (2011). Este último utilizó nueve zonas para agrupar a las formaciones geológicas. Krienen agrupó estas zonas en cuatro unidades hidroestatigráficas utilizando sólo tres, dejando fuera a las formaciones del Caracol e Indidura. Este modelo (2023) si contempló las cuatro unidades.

La estimación de la recarga y su distribución fue distinta en los cuatro modelos que se contraponen. Esta investigación concideró porcentajes respecto al valor de la infiltración (5 %), retornos agrícolas y urbanos, así como tomar en cuenta las pérdidas de transmisión determinadas por Pacheco-Guerrero (2019). La recarga derivada del escurrimiento en la zona de recarga no se había considerado en modelos pasados debido a que la investigación de Pacheco es del 2019 y es la primera vez que se considera dentro de un modelo numérico de flujo.

El periodo de simulación y calibración en los cuatro modelos comparados en esta sección tuvieron más desarrollo en estado transitorio que en estado estacionario. La calibración en este último estado sólo fue realizada por Krienen la cual lo utilizó para conocer las condiciones de entrada del flujo, el resto de los modelos contemplados no lograron establecer el estado de equilibrio. En la simulación y calibración en estado no estacionario, se logró una calibración promedio de los siete periodos de medición de 90.36 % con un periodo de validación; Krienen

con cuatro periodos (1997-2015 dejando fuera el periodo de 2009) logró una calibración de 76 % algo similar a Hernández (1954-1990) con una calibración del 75 % usando 2 periodos de validación. El porcentaje de similitud promedio de los dos periodos de validación fue de 44 % (un error promedio NRMSE = 56 %) por lo cual el modelo de esta investigación (2023) tuvo una mayor validez (el doble de similitud). El cuadro 3.8 presenta un resumen comparativo de los cuatro modelos analizados.

Cuadro 3.8: Tabla comparativa de los cuatro modelos discutidos

Modelo	Amaya (2023)	Krienen (2018)	Hernández (2012)	IGH (2011)
<i>Software</i>	VMOD(2009)	FEFLOW (2016)	MODFLOW (2000)	VMOD(2009)
Simulación (días)	10065	6608	18250	14235
Área Dis. (km^2)	5400	1112.7	SD	3360
Periodos Calibración	7	4	4	3
Calibración (NRMS)	9.64	24	25.5	SD
Parámetro Sensible	Ss	Recarga	SD	K
Validación	Si	No	Si	No

Capítulo 4

Resultados y análisis de la evaluación de escenarios futuros de los sistemas de flujo de agua subterránea

4.1. Introducción

En muchos modelos numéricos de agua subterránea el propósito es la aplicación de pronósticos futuros (Anderson y cols., 2015) o proyección de escenarios futuros. Estos escenarios de predicción se desarrollan utilizando modelos calibrados llamados modelos base (Anderson y cols., 2015). Estos escenarios pretenden ser el motor que ayude en la gestión del agua. Para el caso del modelo del Aq Cal que se describieron tres escenarios. El primero que contempla las tendencias anuales de extracción de agua, el segundo se basó en tendencias climáticas que afectan principalmente en la recarga vertical, y por último un escenario donde se describió la implementación de técnicas de conservación de suelo que se llevaron a cabo en la zona de la cuenca. Para este último se hizo uso de los resultados de un modelo elaborado en SWAT.

4.2. Escenario uno: Proyección de tendencias actuales de extracción de agua subterránea

4.2.1. Descripción del Escenario

Para este primer escenario se evaluaron las tendencias de extracción anual de agua (volumen concesionado), estos volúmenes fueron los publicados por el REPDA (ver Capítulo de antecedentes).

Es claro que la relación del volumen concesionado contra el año de concesión tuvo un incremento sustancial durante los años de 1995 hasta aproximadamente 2002, esto se tomó en consideración ya que no se puede hablar de un mismo periodo porque los datos suelen agruparse a pendientes medias distintas. Para conocer el punto o año donde existe un cambio en esta pendiente se hizo uso del método de ruptura de Pettitt el cual nos indica en qué valor

de la serie existe una diferencia entre estas pendientes medias. Este método es muy utilizado en el análisis de series de tiempo hidrológicas y climáticas (Machiwal y Jha, 2012).

Para analizar este parámetro se hizo uso nuevamente del lenguaje de programación R mediante *Rstudio*. Usando la librería *Trend* se aplicó el método de Pettitt (`Pettitt.test(x)`) donde el valor 'x' de la función es la serie de concesiones otorgadas durante el periodo de 1994-2021. El análisis denota que la ruptura se dio en el año 2003 por lo que se sugirió que los valores de 1994-2002 pertenecen a una serie de tiempo estadísticamente similar y los valores de 2003-2021 son otra. Para este caso, el escenario se proyectó usando los datos de 2003 a 2021 y se observará esa tendencia.

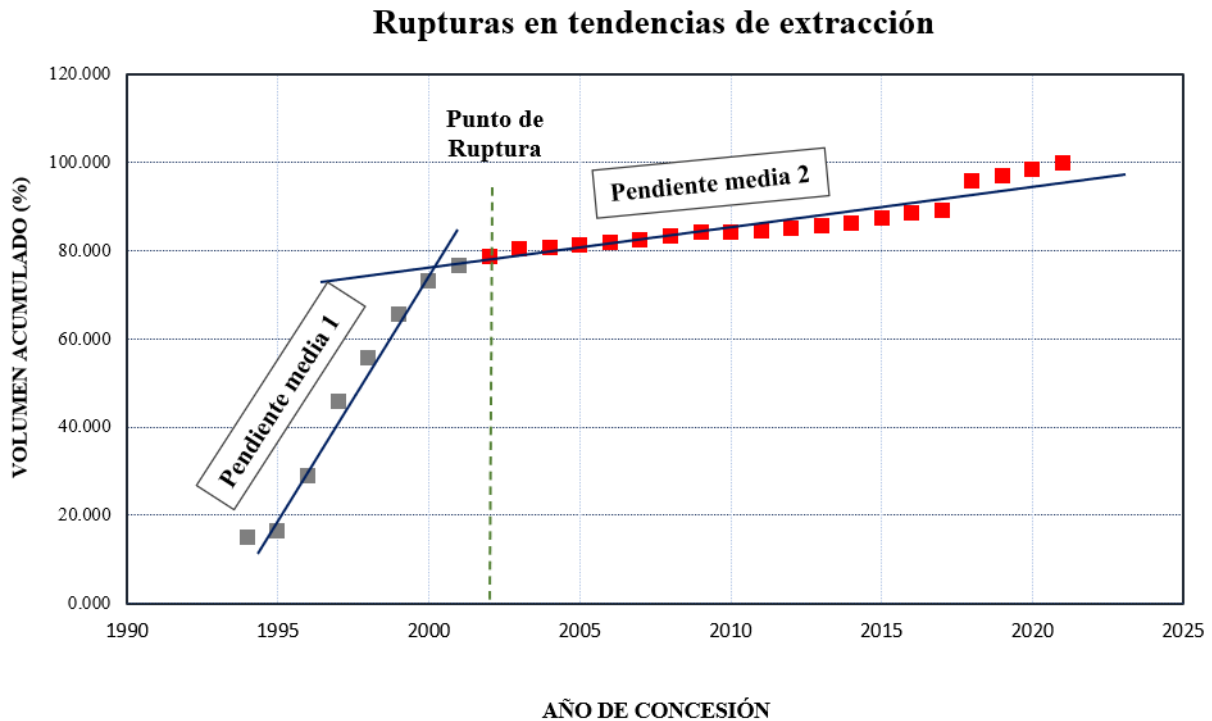


Figura 4.1: Punto de ruptura y pendientes en la serie de tiempo de extracciones contra el año de concesión.

Aplicando los métodos de detección de tendencias en series de tiempo podemos conocer la significancia de la tendencia y qué tanto está variando. Aplicando los métodos de Mann-Kendall y pendiente de Sen como se vió en la parte final del capítulo 2 se encontró que la significancia en la concesión acumulada de 2003 a 2021 fue de **5.9475** y la magnitud de cambio de **1.231 $hm^3/año$** .

Al tener datos que históricos de 27 años (1994-2021) para tener proyecciones con la menor incertidumbre debemos proyectar 27 años en el futuro (es decir hasta 2048). Siguiendo la misma tendencia, el consumo de agua aumentará a **195.19 $hm^3/año$** .

En el caso de una regresión lineal simple, la ecuación propuesta para el modelo fue:

$$y = 1.7557x - 3382.8 \quad (4.1)$$

Donde: y = el volumen concesionado a futuro en millones de metros cúbicos y x es el año de predicción. Para el mismo caso del año 2048, el modelo lineal predijo que el consumo será de $212.87 \text{ hm}^3/\text{año}$.

La implementación en el modelo puede sugerir un aumento porcentual en cada uno de los pozos existentes (mayor extracción), creación de nuevos pozos o cambio de uso del pozo, es decir, pozos agrícolas por pozos industriales o de consumo humano.

4.2.2. Implementación en el modelo numérico

El crecimiento poblacional genera mayor demanda en los recursos hídricos, tanto para su consumo directo como para actividades alimentarias y de recreación. Debido a esto se optó por aumentar el número de concesiones que anualmente hicieran que la demanda de agua incrementara en 1.231 hm^3 en los usos de agua público-urbano, doméstico y servicios, dejando fuera al uso agrícola. Este aumento en la demanda se hizo mediante pozos de bombeo con extracción continua colocados de forma aleatoria dentro de la zona del acuífero, creando ocho concesiones al año con una extracción igual a $421.575 \text{ m}^3/\text{día}$. El sistema de recarga es el mismo que se abordó en la subsección 3.3.8. Recarga con la distribución presentada en la figura 3.18. En la figura 4.2 se muestra la distribución espacial de los nuevos pozos.

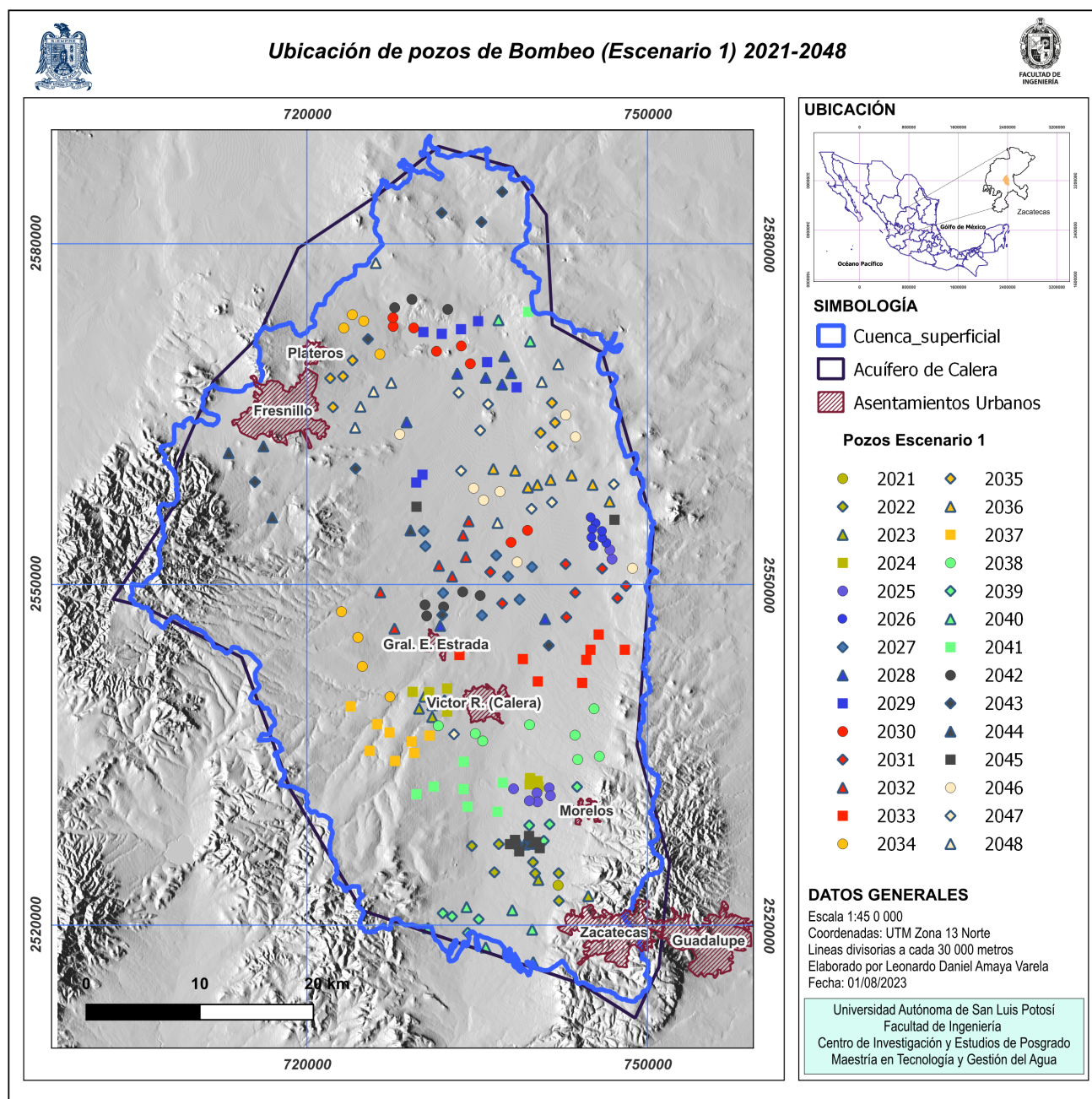


Figura 4.2: Ubicación de nuevos pozos de extracción propuestos en el escenario 1.

4.3. Escenario dos: Incidencia de la Variabilidad Climática en la recarga del acuífero

4.3.1. Descripción del escenario

La Descripción de los resultados y la conceptualización de la VC se vio en el capítulo 2 (*Modelo Conceptual del Acuífero de Calera, Zacatecas*) por lo que en esta sección se centrará

en la implementación de dichos resultados.

Como se describe en el subcapítulo de la VC, los análisis mensuales no presentan tendencias muy importantes en el acuífero (sólo aumento de la precipitación en el mes de septiembre) no así en las tendencias anuales de la precipitación y temperatura medias. Con los valores de cambio en las tendencias anuales (magnitudes de cambio) se proyectaron los aumentos o disminuciones de milímetros en precipitación y °C en temperatura media en cada una de las estaciones climáticas.

4.3.2. Implementación en el modelo numérico

El valor medio de las estimaciones en el análisis de VC de las series de tiempo de precipitación y temperatura se utilizaron para calcular la evapotranspiración real, el escurrimiento neto y la infiltración para el año medio (2036) de la serie de tiempo debido a que las tendencias otorgan un valor cuya función es lineal en el tiempo y además VMF sólo admite valores promedios. Para el cálculo de la precipitación y temperaturas medias anuales proyectadas se utilizó el método de isoyetas con los valores proyectados promedios de las estaciones utilizadas. La precipitación media anual proyectada fue de 469.165 mm/año y la temperatura media proyectada de 16.38°C/año. La ETR proyectada se calculó en 398.004 mm/año; el escurrimiento se proyectó en 458.623 mm/año; el escurrimiento neto por lo tanto en 60.62 mm/año y la infiltración en 10.542 mm/año.

La figura 4.3 muestra la distribución espacial de los parámetros analizados. La precipitación sigue una distribución de suroeste (SW) hacia noreste (NE) y la temperatura de Noroeste a Sureste. Para su implementación dentro del modelo se aumentó la cantidad de recarga a partir de los resultados del balance hídrico proyectado promedio en las zonas que afecta. El aumento de la cantidad de precipitación afecta principalmente la zona de recarga.

El área de las zonas de recarga no se modificó dado que el aumento de la precipitación sigue la dirección del flujo subterráneo del acuífero. No así para los valores de recarga. Dado el crecimiento en el escurrimiento derivado del aumento en la precipitación, la recarga en la zona de rocas volcánicas que afloran y arroyos (Zona 2 en el modelo numérico) pasó de 15.89 mm/año a 16.37 mm/año. Las rocas volcánicas debajo del conglomerado (Zona 5 en el modelo) pasó de 12.58 mm/año a 17.02 mm/año conservando el porcentaje de agua que recarga a partir del retorno agrícola. La zona de cultivos (Zona 4) se elevó a 4.77 mm/año y finalmente la zona 6 de recarga derivado de la lluvia sólo aumentó 0.03 mm/año quedando en 0.53 mm/año.

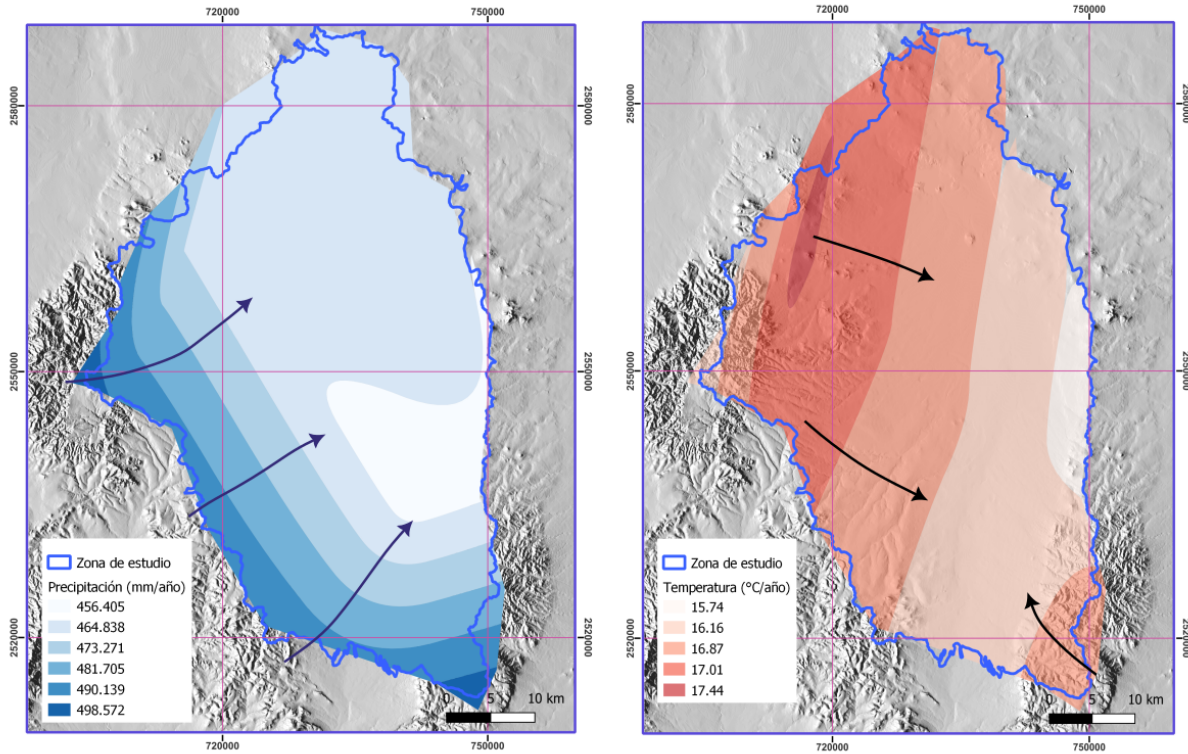


Figura 4.3: Isoyetas de la distribución espacial de la proyección de la tendencia en la precipitación y temperatura media anual (proyección media 2023-2048).

4.4. Escenario tres: Estrategias basadas en la naturaleza en la mejora de la recarga de agua en el acuífero

4.4.1. Descripción del Escenario tres

En la actualidad el sistema de uso de agua está basado en un esquema lineal que busca tener cómodas fuentes de abastecimiento, tratamiento rápido del agua residual y una sencilla deposición, es decir, el agua utilizada no es reutilizada una vez que se ha tratado (O'Hogain y McCarton, 2018). Cuando los conceptos de economía circular y reutilización del agua fueron acuñados, el sistema lineal pasó a un sistema circular, para esto se mejoraron los sistemas de tratamiento y reutilización de los recursos naturales. Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) llegaron a ser herramientas de mejora en el medio ambiente.

O'Hogain y McCarton (2018) dictan que las SBN son:

[...]son tanto sistemas naturales como sistemas contruidos los cuales utilizan y refuerzan los tratamientos físicos, químicos y microbiológicos. Estos tratamientos forman los procesos científicos y de ingeniería para el tratamiento de agua potable y agua residual e infraestructura hidráulica. Las SBN son de bajo costo, requieren poca energía para su operación y

mantenimiento generando bajos impactos ambientales y provee un valor agregado a través de los beneficios para la humanidad. Estos beneficios incluyen la biodiversidad, mitigación de los efectos del cambio climático y restauración de ecosistemas.

Este concepto (SBN) se adoptó de un informe sobre políticas en biodiversidad y conservación, adaptación al cambio climático y uso sustentable de los recursos naturales que se realizó en la primera década del siglo XXI. Estas nuevas técnicas son simplemente soluciones para la mejora de la naturaleza desde la naturaleza misma (O'Hogain y McCarton, 2018).

Estas herramientas se han aplicado en el manejo de recarga de acuíferos las cuales son técnicas que ayudan en la introducción de AS. Las técnicas más utilizadas son los estanques de infiltración, pozos profundos y trincheras de captación (O'Hogain y McCarton, 2018) siendo el más utilizado la infiltración a partir de estanques. Este método tiene ventajas contra los demás, por ejemplo, presenta bajos costos de construcción, operación y mantenimiento, ayuda en la permanencia de agua en la zona no saturada y mejora la calidad de agua que ingresa al acuífero. Sin embargo, una desventaja es que sólo es aplicable en áreas extensas donde se tienen rocas con alta permeabilidad (como las rocas fracturadas).

Las diversas técnicas de mejora en la recarga de agua en el acuífero se aplicaron en las zonas de recarga esto con motivo de un programa de gestión integral del agua en la zona. En este programa participaron tanto instituciones privadas como públicas en las que se implementaron mejoras en el suelo. Estas acciones en la mejora de la infiltración se conocen como Gestión de Recarga de Acuífero o *Managed Aquifer Recharge* (MAR) por sus siglas en inglés.

Para el Aq Cal las obras contemplaron:

1. Pozos de infiltración profunda y somera.
2. Estanques de infiltración mediante cabeceo de cárcavas.
3. Limpieza de Cárcavas.
4. Zanjas de infiltración o trincheras.
5. Pequeñas represas de gaviones.
6. Barreras de vegetación y rocas para evitar la erosión y depositación en el valle.
7. Bordos de control.
8. Plantación de especies afines a la zona (Cactáceas principalmente).

Este tipo de mejoras se elaboraron en las subcuencas seleccionadas como prioritarias por su ubicación estratégica que contempla un fácil acceso, que estuvieran dentro de zonas de recarga identificadas en el Aq Cal, cercanas a poblaciones rurales, entre otros requisitos. Estas herramientas de MAR se implementaron y simularon en el modelo SWAT. Los resultados indican un aumento en la recarga (percolación) de 1 milímetro en las cuencas intervenidas.

4.4.2. Implementación en el modelo numérico

Para su simulación dentro del entorno de VMF se cambió el esquema de recarga. La recarga ahora se hizo mediante las 38 subcuencas generadas en el modelo, cabe resaltar que no se está considerando otro tipo de recarga más que la simulada mediante SWAT, es decir, no intervienen las recargas por retorno agrícola o por fugas en las redes de abastecimiento público. Sin embargo, se tomaron en consideración los porcentajes de infiltración que originan a la recarga vertical.

Cuadro 4.1: Valores de la recarga en cada una de las subcuencas generadas mediante SWAT (R =Recarga, SC =Subcuenca).

SC	R. (mm/año)	SC	R. (mm/año)	SC	R. (mm/año)
1	5.82	14	4.37	27	3.81
2	4.88	15	11.89	28	9.95
3	5.97	16	2.08	29	9.05
4	6.19	18	4.03	30	9.77
5	5.08	19	9.39	31	2.69
6	5.43	20	10.06	32	3.10
7	3.41	21	6.00	33	9.94
8	6.71	22	4.60	34	0.30
10	1.84	23	1.67	35	2.09
11	8.63	24	9.85	36	1.77
12	3.36	25	8.05	37	11.11
13	0.96	26	1.80	38	3.58

De las 38 subcuencas, se seleccionaron ocho como subcuencas prioritarias a las que se les sumó **1 mm** adicional al valor propuesto de recarga. Para las subcuencas localizadas en la zona de recarga, se les asignó el 15 % de su escurrimiento neto (sin considerar la ETR), esto de acuerdo con Pacheco-Guerrero (2020). El resto de las subcuencas generaron una recarga equivalente al 5 % del valor de la percolación que como se observó en la figura 2.19, un porcentaje alto se convierte en flujo base dentro de la cuenca. Las Subcuencas Número 9 y 17 debido a su tamaño y poca recarga se anexaron a la subcuenca número 8 colocando el valor máximo de recarga esto con el fin de tener menos zonas de recarga y zonas de baja influencia. Estas cuencas no están contempladas dentro de las prioritarias por lo que no tendrá una fuerte influencia en los resultados. En total se establecieron 36 zonas para la recarga vertical.

La extracción mediante bombeo no se aumentó como lo hecho en el escenario uno. La extracción es constante a partir del día 10066 y no se han establecido nuevos pozos de extracción.

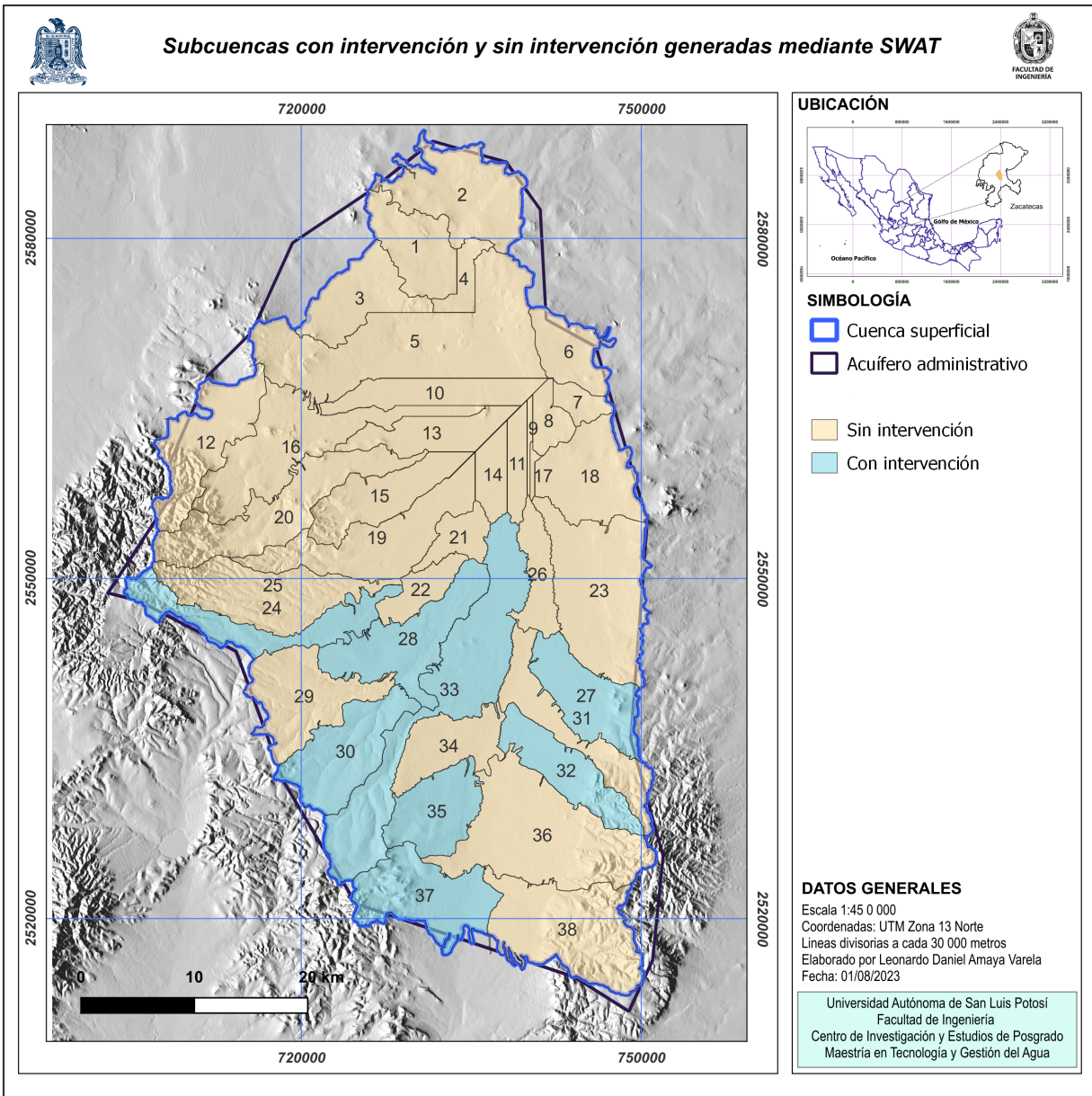


Figura 4.4: Subcuencas generadas mediante SWAT y subcuencas priorizadas para implementación de manejo de recarga de acuíferos.

4.5. Resultados de las simulaciones

Los resultados de las simulaciones se expresan mediante la generación de balances hídricos proyectados y curvas de abatimiento del nivel estático para cada uno de los escenarios evaluados. Como se vio en el capítulo de implementación del modelo, se debe conocer la diferencia de los valores calculados mediante un error (valor calculado / valor simulado), este error nos indica qué tan distintos son los resultados de la simulación con el sistema hídrico real.

4.5.1. Escenario uno

Los valores de la extracción calculados siempre se encuentran por encima del valor simulado entre un 6 % en el año 2023 a 17.25 % en el último año de simulación en el escenario. El parámetro de recarga mantiene una diferencia frente al valor simulado del 11 % en todos los años, es decir, una diferencia de 1092.94 hm^3 en el último día de simulación. Las curvas de abatimiento anual mostradas en la figura 4.5 indican un mayor abatimiento en la zona norte de la comunidad de Calera con descensos de 1.40 m anuales, es decir en 27 años si se sigue con la apertura de concesiones que eleven la demanda anual, podría presentarse abatimientos de 37.8 m. En la región Oeste de la cabecera municipal de Fresnillo se presentan los mayores abatimientos de hasta 1.7 m anuales, es decir, 45.9 m en los 27 años. Esto posiblemente debido a las características hidráulicas de las rocas calizas. Las áreas de recarga presentan los abatimientos más bajos.

Cuadro 4.2: Resultados de la simulación del escenario uno. (Valores hm^3).

	Calculado (C)		Simulado (S)		C/S	
Año	Extracción	Recarga	Extracción	Recarga	Extracción	Recarga
2023	3093.656	391.496	2908.398	439.682	1.064	0.89
2025	3397.400	418.967	3182.755	470.534	1.067	0.89
2028	3862.299	460.173	3589.801	516.812	1.076	0.89
2031	4338.338	501.379	3993.963	563.090	1.086	0.89
2034	4825.516	542.586	4393.656	609.368	1.098	0.89
2037	5323.834	583.792	4790.130	655.646	1.111	0.89
2040	5833.292	624.998	5184.916	701.924	1.125	0.89
2043	6353.889	666.204	5573.626	748.202	1.140	0.89
2046	6885.627	707.410	5956.963	794.480	1.156	0.89
2048	7246.307	734.881	6210.123	825.332	1.167	0.89

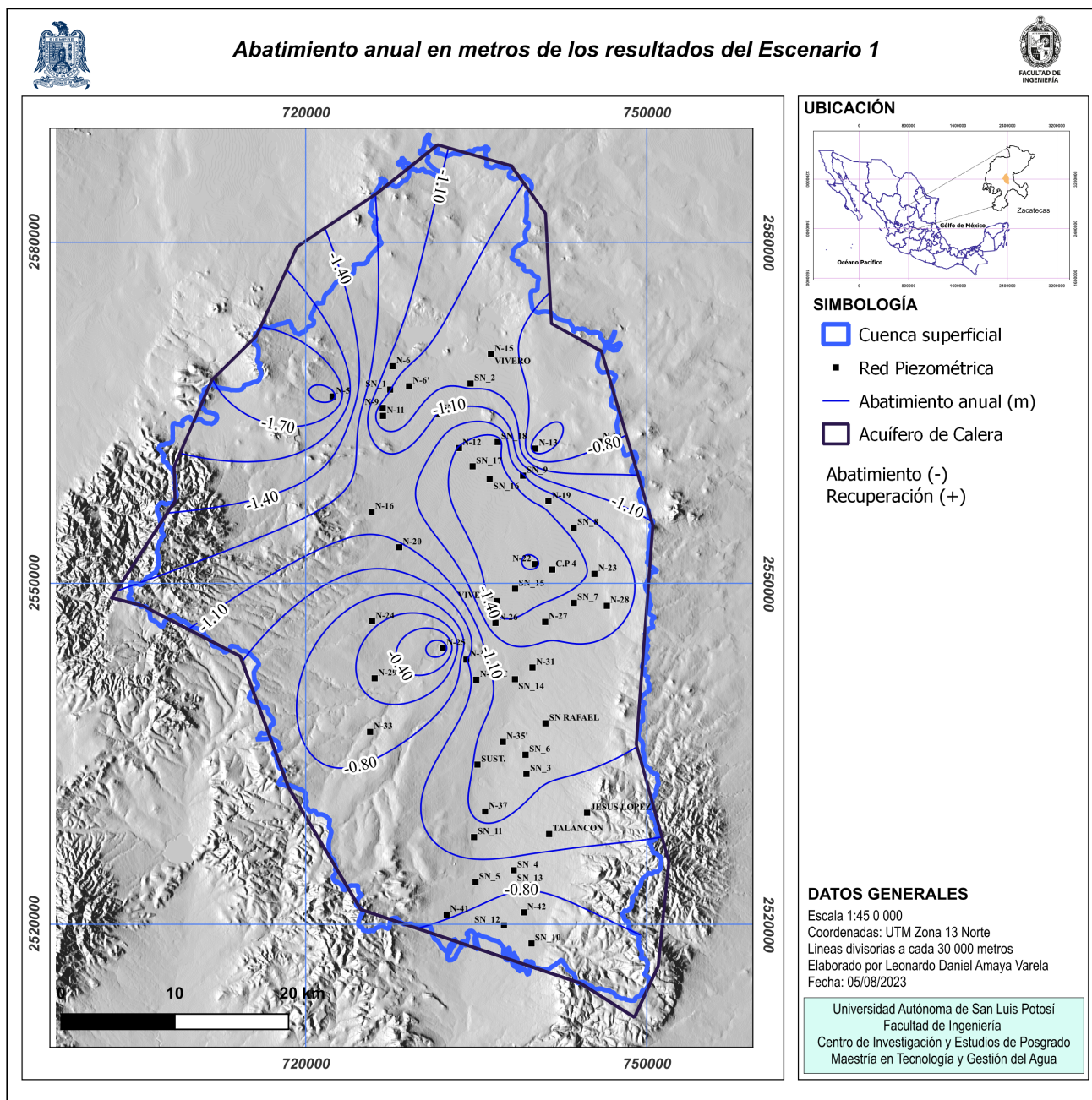


Figura 4.5: Curvas de abatimiento anual del nivel estático para el escenario uno.

4.5.2. Escenario dos

El balance hídrico para el escenario dos mantiene una persistencia similar al balance del escenario uno (cuadro 4.2). La VC en la zona generó un aumento de la recarga vertical de 75.1378 hm^3 para el día 19948 en comparación con el valor en el mismo día, pero sin impacto de la VC (Escenario 1). La diferencia entre la recarga vertical de la simulación y el cálculo se mantuvo prácticamente igual al escenario uno debido a que no existió cambio en la distribución espacial de la percolación al nivel freático. En la extracción se generó un aumento del 10 % en 27 años en lo simulado contra lo calculado. El abatimiento (ver figura 4.6) se ve afectado por el aumento de la recarga derivada de la VC anual, las zonas se abaten anualmente 0.1 metros en promedio menos que lo mostrado en el análisis del escenario uno. Es evidente que la no apertura de nuevas concesiones y el aumento de precipitación en la zona de recarga establece impactos positivos sobre el abatimiento del nivel estático.

Cuadro 4.3: Resultados de la simulación del escenario dos. (Valores hm^3).

	Calculado (C)		Simulado (S)		C/S	
Año	Extracción	Recarga	Extracción	Recarga	Extracción	Recarga
2023	3093.181	426.302	2907.644	478.975	1.064	0.89
2025	3392.61	456.215	3177.847	512.584	1.068	0.89
2028	3841.753	501.084	3571.681	562.997	1.076	0.89
2031	4290.897	545.954	3954.709	613.411	1.085	0.89
2034	4740.04	590.823	4325.167	663.825	1.096	0.89
2037	5189.184	635.693	4683.977	714.239	1.108	0.89
2040	5638.327	680.562	5034.791	764.653	1.12	0.89
2043	6087.471	725.432	5373.801	815.067	1.133	0.89
2046	6536.614	770.302	5700.887	865.481	1.147	0.89
2048	6836.043	800.215	5912.899	899.091	1.156	0.89

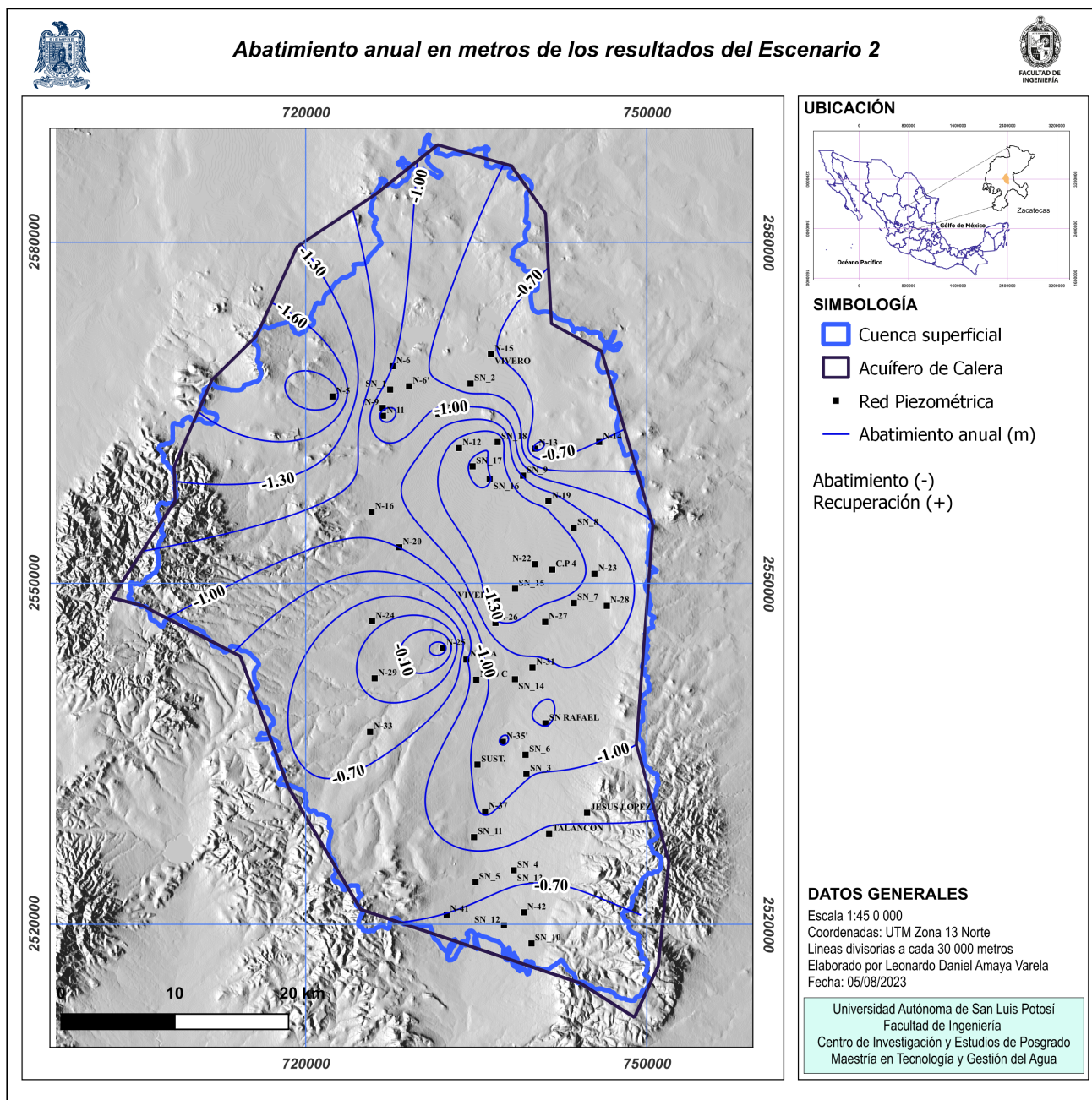


Figura 4.6: Curvas de abatimiento anual del nivel estático para el escenario dos.

4.5.3. Escenario tres

La recarga vertical por subcuencas sin considerar otro tipo de recarga generó desviaciones en los errores correspondientes a la calibración, pero son mínimos, esto debido a la sensibilidad del modelo al cambio espacial y de cantidad en la recarga vertical. Es evidente el aumento en este parámetro, de una recarga de 725.34 hm^3 en el día 19948 con cuencas sin intervención pasó a 759.23 hm^3 con cuencas intervenidas en el mismo día. Las diferencias entre parámetros simulados y calculados en los dos balances de este escenario son muy similares y mantienen una gran similitud con los dos escenarios anteriores. El aumento de la recarga derivada de la aplicación de MAR no afecta en el volumen de extracción, ambos balances se mantienen con mismos valores. En el caso de la recarga, las mejoras en el manejo del suelo aumentaron el ingreso de agua en 1697 m^3 al día. El abatimiento sigue una distribución similar a la presentada en el escenario 2, la mejora en el ingreso de agua en las cuencas sobre la zona de recarga tiene un impacto similar al aumento de la cantidad de recarga derivada del aumento de la precipitación.

Cuadro 4.4: Resultados de la simulación del escenario tres sin mejoras aplicadas. (Valores hm^3).

	Calculado (C)		Simulado (S)		C/S	
Año	Extracción	Recarga	Extracción	Recarga	Extracción	Recarga
2023	3093.181	330.568	2769.746	365.996	1.117	0.903
2025	3392.61	353.763	3176.228	405.96	1.068	0.871
2028	3841.753	388.557	3569.298	445.887	1.076	0.871
2031	4290.897	423.35	3951.422	485.814	1.086	0.871
2034	4740.04	458.143	4320.987	525.741	1.097	0.871
2037	5189.184	492.937	4678.667	565.667	1.109	0.871
2040	5638.327	527.73	5028.251	605.593	1.121	0.871
2043	6087.471	562.523	5364.363	645.518	1.135	0.871
2046	6536.614	597.316	5689.694	685.444	1.149	0.871
2048	6836.043	620.512	5899.958	712.061	1.159	0.871

Cuadro 4.5: Resultados de la simulación del escenario tres con mejoras aplicadas. (Valores hm^3).

	Calculado (C)		Simulado (S)		C/S	
Año	Extracción	Recarga	Extracción	Recarga	Extracción	Recarga
2023	3093.181	346.04	2919.746	397.045	1.059	0.872
2025	3392.61	370.321	3176.228	424.905	1.068	0.872
2028	3841.753	406.742	3569.298	466.695	1.076	0.872
2031	4290.897	443.164	3951.422	508.485	1.086	0.872
2034	4740.04	479.586	4320.987	550.275	1.097	0.872
2037	5189.184	516.008	4678.667	592.066	1.109	0.872
2040	5638.327	552.429	5028.251	633.856	1.121	0.872
2043	6087.471	588.851	5364.363	675.647	1.135	0.872
2046	6536.614	625.273	5689.694	717.437	1.149	0.872
2048	6836.043	649.554	5899.958	745.297	1.159	0.872

4.5.4. Resumen y discusión de los resultados de la evaluación de escenarios futuros

La figura 4.8 muestra las cantidades de extracción calculados y simulados en cada uno de los escenarios propuestos. Las líneas que indican la extracción dada los valores calculados presentan sustracciones de AS mayores que los pronosticados por VMF en los tres escenarios propuestos. La sustracción de agua pronosticada en los escenarios dos y tres presenta los valores más bajos. En el caso de la recarga vertical, la propuesta en el balance calculado para el escenario 3 presenta los valores más bajos, mientras que en el escenario dos (con ingreso de agua simulada) manifiesta los valores más alto de recarga. Las cantidades de agua de recarga simuladas en el escenario tres son muy similares a la recarga calculada en el escenario uno siendo esta última ligeramente menor (ver figura 4.9).

La gráfica fijada en la fig. 4.10 se evidencia que conforme los días aumentan, el error en todas las simulaciones de escenarios futuros aumenta también, es decir, entre más alejados de los días con medición con los que se puede calibrar el modelo, la predicción del parámetro es menos confiable. Los porcentajes de error del escenario uno exhibe un aumento mayor que los otros dos escenarios los cuales guardan una gran similitud en su comportamiento. El aumento en el error sigue un comportamiento exponencial.

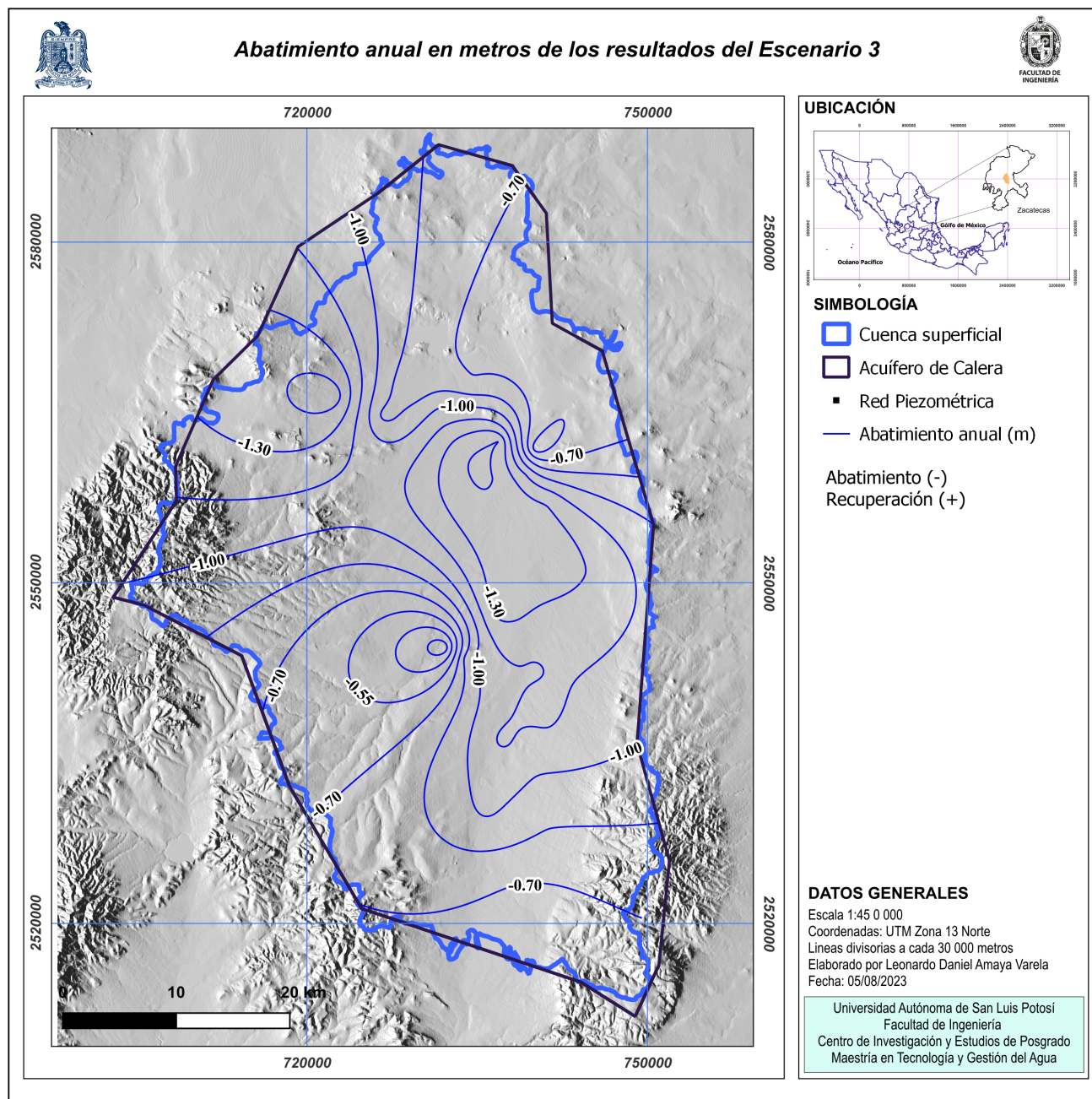


Figura 4.7: Curvas de abatimiento anual del nivel estático para el escenario tres.

De los cuatro modelos comparados (ver Cuadro 3.8) sólo tres incluyeron simulación de escenarios futuros quedando fuera de este análisis el modelo de 2012 (Hernández y cols., 2012).

Si bien es cierto se pueden modelar una infinidad de escenarios donde se modifiquen los valores de los parámetros como la extracción y la recarga que simulan diversas situaciones a las que se pueden presentar los acuíferos, es poco común sustentar estos escenarios y hacer proyecciones más realistas del comportamiento del sistema acuífero. Esta investigación plantea dar solución a este problema sustentando cada uno de los tres escenarios planteados con

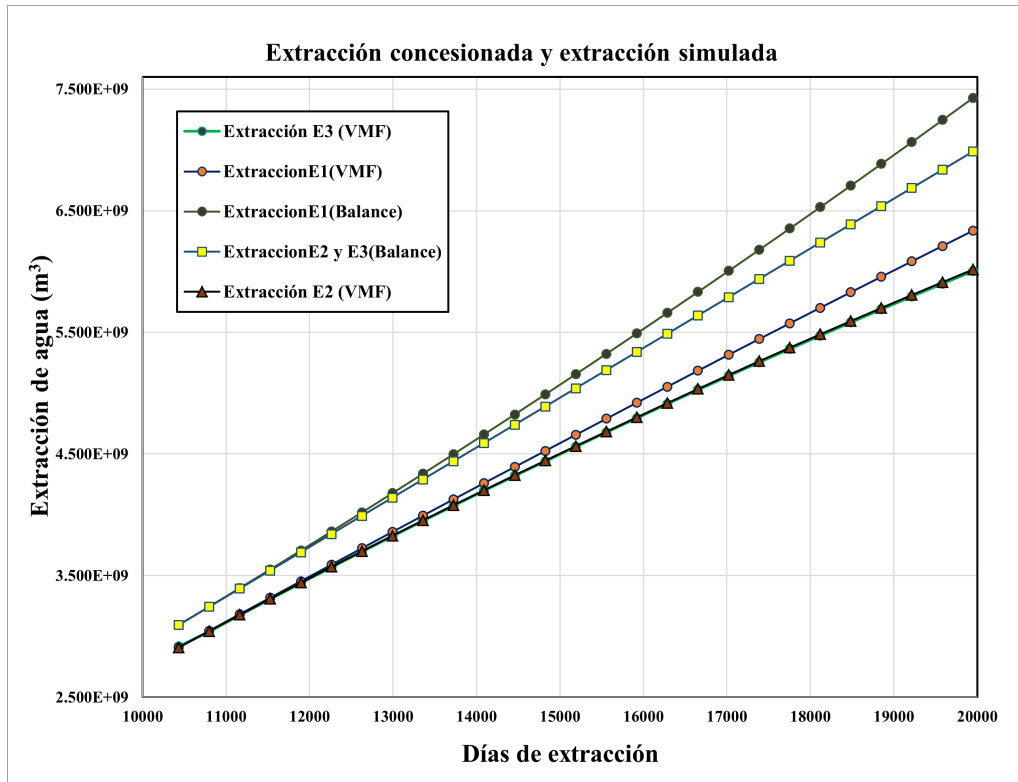


Figura 4.8: Comparación de valores de extracción calculados y pronosticados en el periodo de tiempo de simulación.

un análisis previo.

Los escenarios de aumento o reducción de la extracción son escenarios típicos y se encuentran en los tres modelos examinados en esta sección. El modelo elaborado por IGH (2011) realizó cinco escenarios modificando la extracción en un periodo de 2010-2040. El primero llamado tendencial contempló la reducción en extracción agrícola pero aumento en otro tipo de usos de agua, el segundo *Escenario REPDA* evaluó el comportamiento del acuífero a extracción continua a partir de 2010 (no aumento ni disminución). El tercero o de máxima tecnificación incluyó la reducción de la extracción de cada pozo en un 40 %; El cuarto que contemplo la reducción de la extracción hasta conocer el estado de equilibrio (reducción del 63 %) y el último que realizó el cierre de extracciones en un 100 % a partir de 2010.

La PhD. Lisa Krienen (2018) contempló dos pronósticos que involucraron modificación en la extracción. El primero estudió el comportamiento de los niveles piezométricos al aumentar un 5 % para el año 2060 y el segundo una reducción gradual hasta tener una reducción del 50 % en la extracción agrícola en 2025 y mantener el valor constante hasta 2060.

Estos escenarios comparten un esquema similar al primer escenario que se planteó en esta investigación. El escenario uno del modelo de IGH (2011) observó tendencia al decremento en la extracción agrícola proyectando una disminución generalizada a partir de 2010,

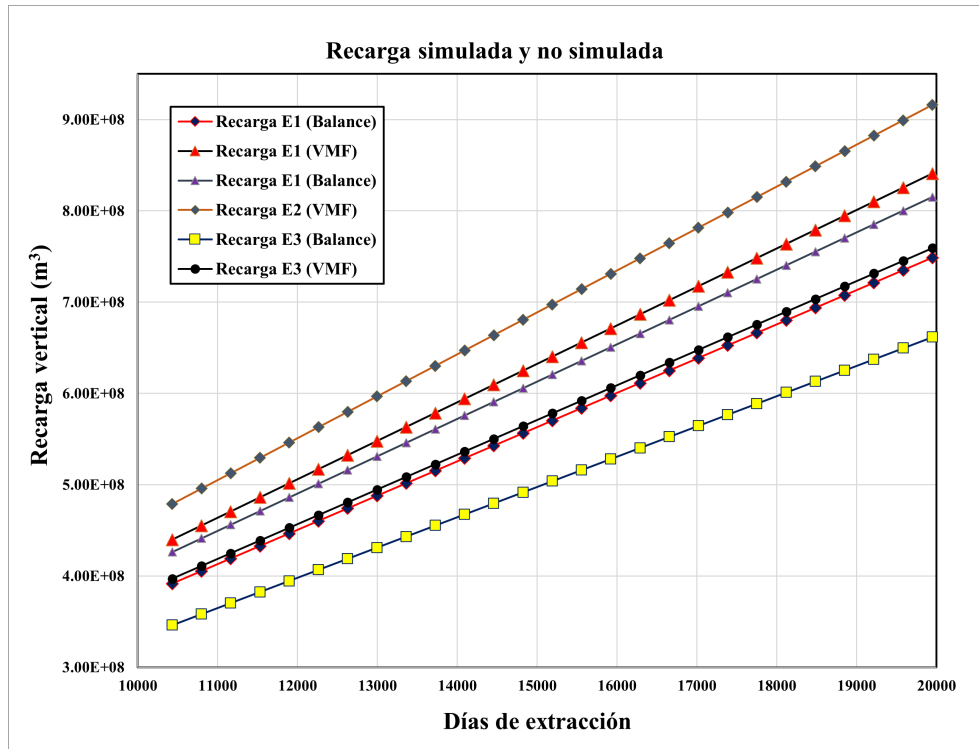


Figura 4.9: Comparación de valores de recarga calculados y pronosticados en el periodo de tiempo de simulación.

sin embargo, la tendencia actual (2003-2021) sugiere un aumento de las extracciones (ver figura 4.1). Esta reducción en la simulación del modelo de 2011 genera las mismas zonas de mayor abatimiento que el modelo actual (2023) que se presentaron en la parte norte centro y noroeste del acuífero con abatimientos máximos de 40 m (2010-2040) (modelo 2011) y 48 m al año (2022-2048) en esta investigación (2023).

Un primer acercamiento en la implementación de los cambios en las variables del clima en un modelo numérico de flujo en Calera se desarrolla en el modelo de Krienen (2018). A diferencia del modelo que se implementó en esta investigación, Krienen sólo consideró los resultados de los efectos del Cambio Climático sobre la recarga y la extracción basándose en investigaciones previas. Su examen indica una reducción del 9 % en la precipitación afectando la recarga vertical y un aumento en la extracción del 5 %. Esto difiere con el análisis de tendencias climáticas presentado en la sección 2.4 la cual indica un aumento en la precipitación, no una reducción. El modelo de este estudio (2023) no contempló el aumento de la extracción derivado de la Variabilidad Climática como lo hecho por Krienen ya que el valor de la temperatura media, la cual podría aumentar la demanda dado por las altas temperaturas, pasó de 16.30°C/año a 16.38°C/año.

Aunque el uso de SWAT-MODFLOW como complemento de *Qgis* es la forma más común de relacionar ambos modelos no es la única forma. El uso de SWAT-MODFLOW parte de la construcción de un modelo SWAT ya elaborado y la elaboración de un modelo de flujo de

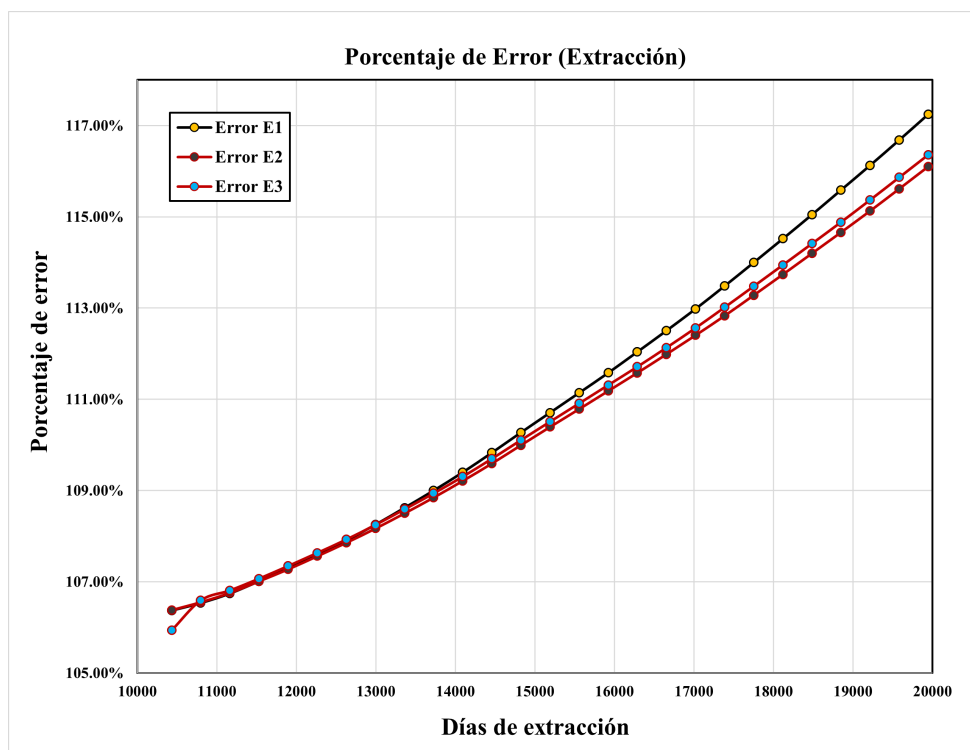


Figura 4.10: Comparación de los porcentajes de error para los tres diferentes escenarios con interés en la extracción.

agua subterráneo simple dentro del entorno, sin embargo, cuando se tienen los dos modelos elaborados por separado la interacción es distinta. Para el caso de esta investigación se utilizó la metodología empleada por Sisay (2023) en la cuenca del Río Modjo en Etiopía central (Sisay y cols., 2023) aplicando los valores de recarga derivados de cada una de las subcuencas generadas. No se realizó la conexión mediante SWAT-MODFLOW debido a que se puede originar una pérdida de la fiabilidad del modelo de agua subterránea. A diferencia del modelo de Sisay, el modelo de esta investigación no utilizó el 100 % de la percolación como recarga, a este parámetro se le implementaron los porcentajes evaluados en el modelo conceptual (5 % de la percolación en subcuencas fuera de la zona de recarga y 15 % del escurrimiento en las ubicadas en la zona de recarga).

El modelo de esta investigación es el segundo en realizarse en México con el acoplamiento de los dos sistemas de modelación. La desventaja con respecto a los diversos estudios de interacción es que el modelo superficial de agua no pasó por un periodo de calibración. Sin embargo, una de las ventajas es que es de los pocos modelos donde se comparan los resultados de los balances otorgados por SWAT y por diversas metodologías (Balance del modelo conceptual) con una gran similitud en los resultados entregados. El valor de la infiltración es el parámetro que más difiere y está de acuerdo con lo investigado en (Y. Wang y Chen, 2021). Además de implementar un modelo de agua subterráneo complejo.

Capítulo 5

Propuesta de estrategias de gestión sostenible en el acuífero de Calera

5.1. Introducción

El término de sostenibilidad nos indica una forma de llevar a cabo nuestras tareas, estas deben satisfacer las necesidades de nuestro tiempo sin comprometer las necesidades del futuro, debemos garantizar las necesidades ambientales, sociales, económicas y políticas del Medio Ambiente, la industria y la sociedad. La sostenibilidad en el manejo del agua involucra el conducir de forma eficaz a los procesos que definen al ciclo hidrológico, esto incluye al agua subterránea (AS) que como se ha mencionado, es la principal fuente de abastecimiento en zonas como Zac con climas semisecos a secos.

El manejo y gestión del AS es un sistema que engloba diversos componentes e involucra a diferentes actores y tomadores de decisiones. Es un sistema multifactorial dinámico. Dentro de su manejo envuelve esquemas sociales, ecológicos y económicos, además de su aspecto técnico (Jakeman, Barreteau, Hunt, Rinaudo, y Ross, 2016). Tratar el problema de la disponibilidad de agua solamente desde uno de los enfoques genera una mala gestión que deriva en problemas ecológicos y socioeconómicos. Por ello la participación conjunta con diversos expertos es fundamental para reducir los impactos negativos a los sistemas hídricos.

En el Aq Cal se han elaborado diversos estudios multidisciplinarios desde la academia y la industria principalmente que han buscado entender mejor el problema del manejo del AS a nivel cuenca-acuífero (Mojarro Dávila y cols., 2013), así como acciones para mejorar las condiciones hídricas y ecológicas de este lugar. Estos estudios involucran los impactos generados por el cambio de uso de suelo y la urbanización de zonas rurales, por el Cambio Climático, la eficiencia del uso del agua de cultivo, impactos en la calidad del agua derivados del abatimiento del nivel estático, mal manejo de residuos sólidos y no tratamiento del agua residual. No sólo eso, los estudios han dado lugar a la implementación de acciones que buscan mejorar la situación histórica de disponibilidad de agua, de entre ellas destaca el uso de técnicas de conservación de suelo y de manejo de la recarga mediante estrategias basadas en la naturaleza, tecnificación del riego en zonas agrícolas, cambio de cultivos a especies con

mejores rendimientos económicos con bajos consumos de agua y cambio de uso de concesiones, de uso agrícola a uso público urbano.

5.2. Estrategias generales para una mejor gestión del agua subterránea en el acuífero

Como se había mencionado con anterioridad, la gestión de los recursos hídricos es una tarea multifactorial que hace partícipes a diversos sectores. Desde las propuestas técnicas se pueden solucionar problemas socioeconómicos y ambientales por lo que se recomienda:

1. Aumentar la eficacia en los sistemas de riego mediante la tecnificación de las unidades de cultivo donde no existen y cambiar a sistemas más eficientes de uso de agua en los sectores donde ya existen. Según estudios de la UAZ para el 2010 dentro de la zona del acuífero, el 35 % de las unidades de riego utilizaban el método de gravedad, otro 35 % utilizaban el método de tubo compuerta y el 30 % restante regaba mediante goteo el cual es un método de alta eficiencia (Mojarro Dávila y cols., 2013). Es recomendable tener un mayor porcentaje de zonas de cultivo con sistemas de riego de alta eficiencia como el goteo y la aspersión, esto impactará de forma positiva en la disponibilidad de agua en la zona.
2. Tener mayor eficiencia energética en los pozos de bombeo. Uno de los principales costos es derivado del consumo energético de los pozos de extracción y aunque existen algunos subsidios al uso de la energía eléctrica, esta no es suficiente para atenuar los costos. Se deben establecer mejoras en la eficiencia electromecánica de los pozos para tener el mejor rendimiento al menor costo de uso energético. Aunque el impacto de esta mejora no se representa directamente en el agua del acuífero si lo hace en la economía de los usuarios.
3. Promover la producción de alimentos con el mayor ingreso y el menor uso de agua. Esta alternativa sugiere validar los costos de producción de los principales cultivos en la zona (básicos, chile, hortalizas, forrajes) y contrastarlo con el precio de venta y el uso de agua. Los investigadores de la UAZ que han evaluado esta situación han sugerido el incrementar el cultivo de hortalizas ya que es la que ofrece mejor rendimiento económico con el menor uso de agua.
4. Tener acceso a la información y establecer acciones que generen información con una periodicidad más corta. El acuífero ya cuenta con una red piezométrica que es administrada por el Consejo Técnico de Agua Subterránea (COTAS) de Calera y la CONAGUA. Esta red suministra valores anuales de nivel piezométrico y la información es de uso libre. Es recomendable tener periodos más cortos de medición de los niveles y que estos nos ayuden a tomar acciones más inmediatas. El uso de tecnologías de la información puede ayudar a conocer el estado del acuífero en tiempo real y de forma remota, para ello se hace uso de medidores automáticos que envían continuamente el valor del nivel estático en ese punto.

5. Tomar en cuenta la teoría de sistemas de flujo gravitacionales. La gestión del agua en el acuífero por parte de instituciones gubernamentales no toma en consideración la teoría de sistemas de flujo como base en el estudio de la disponibilidad de agua en el acuífero, no establece zonas de recarga y descarga y no diferencia entre flujos regionales, intermedios o locales. Disponer de una legislación que impulse esta teoría y el uso de modelos numéricos ayudará a instituir una mejor administración del agua.
6. Auditar y actualizar los modelos de flujo de agua subterránea. La continua generación de conocimiento de base ayuda a alimentar estos modelos y los hace más robustos y con predicciones más precisas del funcionamiento del agua en el sitio.
7. Generar modelos que involucren tanto los procesos hídricos en la superficie como en la subterránea. El agua de la que depende la recarga del acuífero es proveniente la precipitación. Un correcto balance hídrico superficial origina menor incertidumbre sobre la cantidad de agua de recarga disponible en el sistema acuífero. Esta integración también ayudará a comprender el agua en la superficie dado que no son dos sistemas aislados, además, esta incorporación ayudará a conocer mejor los mecanismos que dan origen a la recarga y establecer zonas importantes de recarga para ser tomadas en los planes de desarrollo urbano e industrial.
8. Modelar la zona no saturada utilizando herramientas que lo permitan. Programas como FeFlow y VMF en sus versiones más recientes permiten modelar esta zona bajo distintos escenarios de recarga y descarga y involucrando medios heterogéneos. El entendimiento del funcionamiento de esta zona nos ayudará a entender mejor los procesos de recarga en el acuífero.
9. Instituir, aunando en el punto cuatro, campañas regulares de medición de parámetros fisicoquímicos. La comprensión de la hidrogeoquímica y la calidad de agua ayudará a las dependencias y organismos públicos y privados a tener mejor certeza de la calidad de agua que pueden encontrar. Indicar zonas de extracción para uso público y doméstico y zonas para uso agrícola y pecuario principalmente.
10. Establecer políticas que agrupen a los diversos sectores para generar presupuestos en pro de la gobernanza hídrica a nivel de cuenca y acuífero, es decir, presupuestos para el control colectivo del uso de agua, esto puede ser mediante la instalación de medidores de flujo, la protección de los SBN y una utilización socialmente responsable creando grupos de regulación que estén conformados por usuarios e instancias gubernamentales.

5.3. Propuestas basadas en los resultados de los escenarios implementados

Para garantizar un modelo sostenible del uso de agua en la zona se deben considerar los diversos factores que involucra su administración. Para este caso se tomaron en cuenta acciones que se basaron en los resultados obtenidos en las diversas secciones. Para esto se aconseja:

Establecer zonas para el abastecimiento público y urbano. En el sistema actual se busca abastecer de agua a zonas urbanas mediante la perforación de pozos en sitios cercanos a estas, si no se cuenta con suficiente información sobre la disponibilidad y calidad del AS, esos nuevos pozos pueden generar pérdidas económicas si la cantidad de agua extraída no es la suficiente, además, de los problemas de salud que involucra consumir agua con calidad media o mala. Para ello se propone considerar las zonas con mejor calidad de agua y con menor abatimiento anual cercanas a zonas de recarga. Según la calidad de agua analizada (del año 2004) una de las zonas con bajas concentraciones de As y F se localiza en la zona sur cercano al límite con el acuífero administrativo de Benito Juárez, otra a pie de monte de la sierra de Zacatecas cercana a la población de Morelos y otra, aunque con ciertas limitaciones, también a pie de monte en la cercanía a la zona de recarga del acuífero.

En el caso de pozos para uso agrícola no se puede tomar la misma consideración pues estos deben estar cercanos a las unidades de riego, no obstante, se puede considerar priorizar las concesiones que se proyecten en zonas con abatimientos menores.

Es importante crear una red de estaciones climáticas a nivel acuífero que otorguen datos regularmente y apoye a las estaciones administradas por el INIFAP. Esto apoyará a comprender mejor los efectos de la VC y el Cambio Climático. Los datos diarios ayudan a entender mejor los efectos del Cambio Climático y valores extremos que los datos mensuales de precipitación y temperatura. Estos eventos climáticos no sólo generan escasez, también pueden crear lluvias torrenciales que ocasionen fuertes avenidas y depositen el suelo en el valle, así como pérdidas materiales y humanas si estos eventos ocurren en zonas urbanas. Para evitar esto las acciones basadas en la naturaleza no sólo ayudan en la recarga, también contribuyen a evitar escurrimientos violentos.

Se propone dar mantenimiento a las obras de manejo de recarga de acuíferos y fundar nuevas zonas donde implementar este método. Aunque estas exigen poca conservación por su simpleza y efectividad, es recomendable establecer un calendario de mantenimiento preventivo para que las características ganadas no se pierdan. La participación ciudadana es crucial para que este tipo de labores sean persistentes en los resultados esperados.

Para tener mejores resultados en el modelo implementado en SWAT es recomendable establecer una estación de aforo en la parte NE de la cuenca donde confluyen todos los escurrimientos. Esta estación hidrométrica que nos permitirá calcular los caudales reales en la salida de la cuenca y utilizar estos valores en la calibración de los resultados de la modelación.

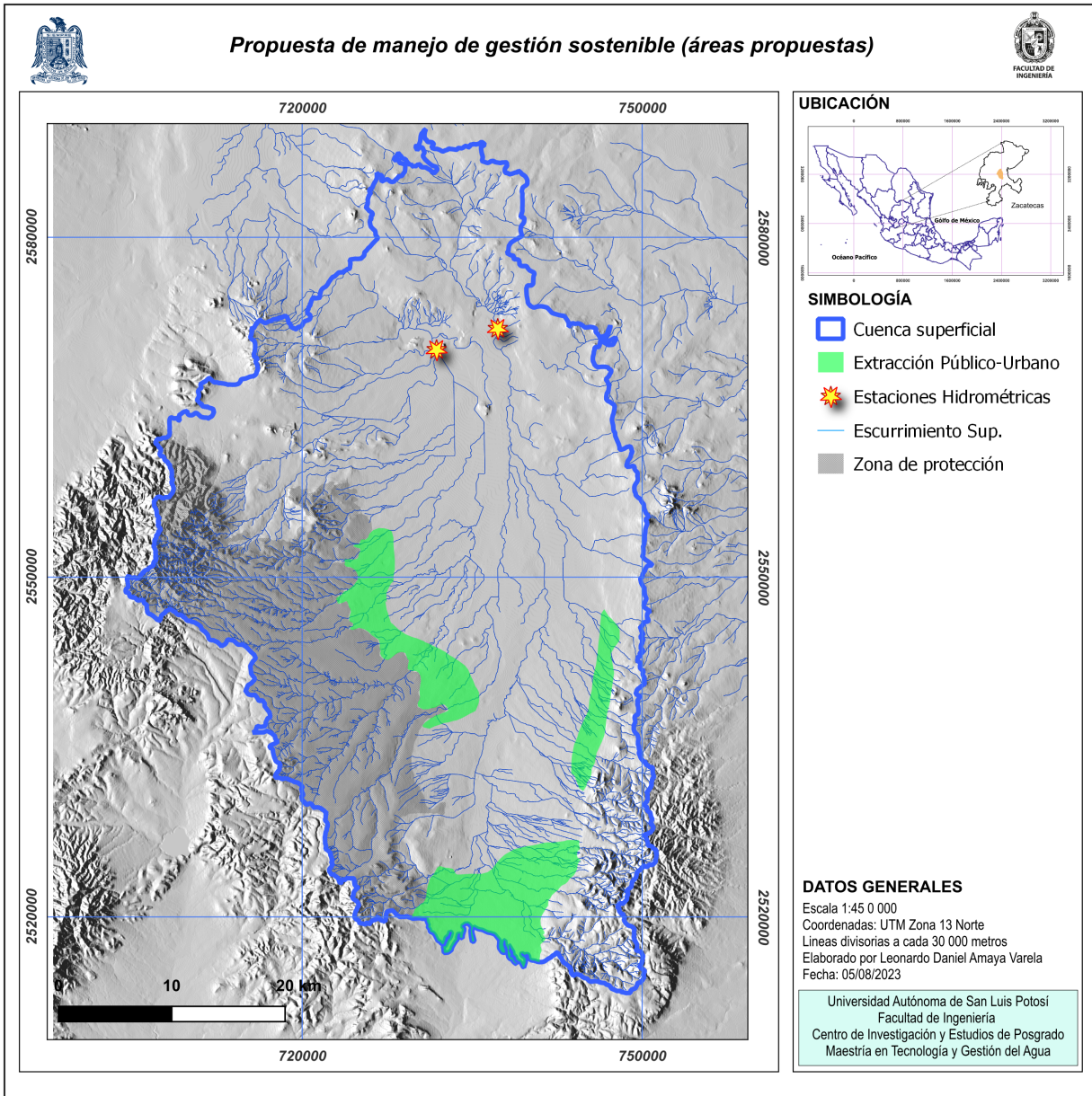


Figura 5.1: Ubicación espacial de las propuestas de gestión sostenible basadas en los resultados de los escenarios futuros evaluados.

Conclusiones.

- La conceptualización de la zona a modelar es uno de los pasos fundamentales en el desarrollo de todo modelo numérico de agua subterránea. Este análisis incluye un balance general de agua que identifica las relaciones del agua con su ambiente. Este balance general define que dentro de la zona del acuífero se expone una precipitación media anual de 445 mm/año con una temperatura media de 16.3°C. Estos valores son consistentes con lo encontrado en la literatura. La Evapotranspiración media anual es de 384.80 mm/año la cual representa 86.47 % de la precipitación indicando un valor alto de evapotranspiración. El escurrimiento medio en la superficie de la cuenca que da origen al acuífero se calculó en 429.34 mm/año (el 96.5 % de la precipitación) utilizando un valor de Curva-Escurrimiento **N** de 74. El valor alto de escurrimiento sugiere que el valor de la ETR está inmerso dentro de este parámetro por lo que el escurrimiento neto promedio es de 88.10 mm/año excluyendo los años donde no ocurrió escurrimiento dado por la baja precipitación. El valor de la infiltración promedio anual fue de 11 mm.
- El modelo conceptual sugiere que la recarga de agua en el acuífero ocurre mediante infiltración de agua de lluvia no teniendo una fuerte interacción con otros acuíferos, sin embargo, el modelo de Krienen (2018) sugirió ingreso de flujos regionales mediante las fallas geológicas, como este modelo no contempla fallas, se descartó el ingreso de flujo regional. La cuenca que enmarca al acuífero es del tipo endorreica por lo que los escurrimientos confluyen al punto topográfico más bajo que son las lagunas de Santa Ana y el Sedano. Esto origina que las entradas de flujo horizontal sean originadas por agua de lluvia.
- El punto crítico del modelo es el conocimiento de la recarga en el acuífero, las suposiciones que se lleguen a considerar tienen un fuerte impacto en los resultados finales. La distribución y cantidad de recarga dependerán de la experiencia y conocimiento del modelador, además de la información existente que permita establecer de forma sencilla la cantidad de agua que ingresa al sistema acuífero. Se deben encaminar más estudios para entender cómo funciona la recarga en los acuíferos que complementen a los modelos numéricos futuros.
- Es sugerible implementar las unidades hidroestatigráficas. Agrupar las diferentes formaciones geológicas según sus capacidades hidráulicas e hidrogeológicas ayuda a simplificar el modelo y tener pocas zonas de acción, así mismo, coadyuva a que el código trabaje más rápidamente. Para lograr esto son necesarias las campañas de medición geofísica y una correcta interpretación de las unidades geoeléctricas que origina a las unidades hidrogeológicas.

- Simular en estado estacionario generó problemas dentro del modelo. VMF requiere que la cantidad de agua que ingresa en el sistema se igual a la cantidad de salida, en este caso, que la cantidad de recarga sea igual a la cantidad de extracciones mediante bombeo más las salidas por flujo horizontal. Se propusieron grandes cantidades de agua de recarga, pero debido al alto volumen de extracción desde los primeros años, VMF no logró converger a la solución. Esto obligó a hacer solamente las calibraciones y simulaciones en estado transitorio.
- La calibración en estado transitorio se logró hasta aproximadamente un 90 % de similitud con el sistema real del acuífero (Modelo conceptual) tanto en las cargas piezométricas como en el balance de agua. La literatura de modelación no establece un porcentaje de error mínimo, pero se sugiere que al menos esté dentro del 20 % (Error normalizado). No es necesario buscar un error por debajo del 5 % si las condiciones del modelo numérico no están de acuerdo con el modelo conceptual, es decir, ingresos o salidas de agua desorbitantes, valores hidráulicos del medio geológico no concordantes con la literatura, no considerar zonas de recarga y descarga, etc.
- Los valores calibrados de las unidades hidroestatigráficas difieren a lo establecido por Krienen (2018), en la UH(Tv) Krienen propuso un valores K horizontal y vertical de $9.0\text{E-}7$ m/s y en la UH(MVS) un valor de $1.0\text{E-}8$ m/s en las tres direcciones, a diferencia de este modelo donde se propusieron valores $K(x,y,z) = 1.01\text{E-}9$ m/s (UH TMvs) y en la UH Tv valores $K(x,y) = 1.089\text{E-}5$ m/s y $K_z = 9.9\text{E-}4$ m/s. Para el caso de la UH(QTU) Krienen propuso seis zonas con distintos valores de conductividad hidráulica con un valor promedio horizontal de $6.0\text{E-}5$ m/s y vertical de $6.0\text{E-}6$ (10 % del valor horizontal). Este valor promedio es cercano al valor propuesto para este modelo (ver cuadro 3.6).
- El análisis de sensibilidad indica que este modelo en particular es más sensible al valor del rendimiento específico, seguido por la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento. Por otro lado la validación del modelo para el día 10065 cuenta con muy pocos pozos medidos por ello el valor de NRMS es más alto que el promedio de los valores utilizados para calibrar. Una mayor cantidad de datos de profundidad del nivel estático puede ayudar a tener una validación más precisa.
- El estudio de tendencias en series de tiempo de precipitación y temperatura tuvo dos vertientes. El análisis mensual de la precipitación suscita que no existen cambios importantes en los meses con baja o nula precipitación, en otras palabras, que los meses de diciembre a mayo en todas las estaciones no existieron cambios significativos. Estos cambios se expusieron en los meses con más lluvia (junio - noviembre) donde el mes de septiembre ofreció los cambios más grandes. Las magnitudes de cambio mayores aparecen en las estaciones de Cañitas de Felipe Pescador (al norte del acuífero) con un aumento anual de 2.6 mm y Malpaso (al sur) con 2.7 mm. En el caso de la temperatura las tendencias no son tan evidentes. La tendencia anual de la precipitación y temperatura media nuevamente muestra valores máximos en las estaciones climáticas indicadas para el caso de la lluvia, y para la temperatura, son las estaciones de Jerez y Boca

del tesoro las que lideran con estos máximos, estas últimas presentan una magnitud de cambio de tan sólo 0.044 y 0.061 °C anuales respectivamente.

- Utilizar un modelo de interacción de agua-suelo en la superficie como SWAT da pauta para mejorar la forma en cómo se conceptualiza la recarga en los acuíferos. Como se ve en el cuadro 2.15, si se hacen las conjeturas correctas, los parámetros calculados y simulados no difieren demasiado. La diferencia promedio para los cinco años de simulación en SWAT contra los valores calculados con datos de 1980-2018 es del 8 % para la precipitación, es decir una similitud del 92 %. En la ETR se tiene una similitud del 77.6 %, 78.4 % en el escurrimiento y finalmente la infiltración tiene la menor similitud presentando errores por arriba del 100 %. Así mismo los resultados medio anuales (ver figura 2.19) permiten concluir que de la cantidad de agua que percola al suelo una cantidad importante retorna a la cuenca como flujo base, otra parte vuelve a evapotranspirarse y sólo aproximadamente el 5 % recarga a lo que denominan acuífero profundo. La forma de interacción entre los datos de salida de SWAT y los datos de entrada en VMF se realizó mediante las subcuencas producidas, a estas se les aplicaron los mismos principios que gobiernan a la recarga establecidos en el modelo conceptual. Para entender mejor esta conexión se puede hacer uso de *QSwatMOD* la cual es una extensión de Qgis que relaciona los valores de salida de SWAT con los valores de entrada para un modelo básico en Modflow. Esto no se utilizó debido a la complejidad de los modelos tratados en esta investigación.
- De forma general los resultados de las simulaciones de los escenarios futuros insinúan que, la no apertura de nuevas concesiones con grandes volúmenes de extracción y el aumento en la recarga derivado de la VC y de las acciones basadas en la naturaleza, los abatimientos anuales pueden reducirse en 0.1 m, es decir 2.7 m en los próximos 27 años. Si se reduce la cantidad de extracción de agua por parte del sector agrícola derivado de la tecnificación del riego, este valor puede aumentar de forma significativa.
- Es recomendable no realizar proyecciones más allá de la cantidad de años que se tiene para calibrar, como se observa en la figura 4.7, el porcentaje de error se eleva de forma exponencial. Los resultados más allá de estos años son menos confiables y no representan de forma realista el comportamiento del acuífero.
- Las propuestas técnicas y científicas no serán viables sin ir de la mano con propuestas económicas y políticas. La buena gobernanza en el manejo del agua involucra a todos los sectores y las soluciones deben ser multidisciplinarias para que la sostenibilidad se cumpla. La legislación ambiental ha tomado reflectores en los últimos años, se han realizado modificaciones a la ley de aguas nacionales y así mismo se ha propuesto una desde la participación ciudadana. Esto último ha sido un gran paso para uno de los sectores más importantes para el desarrollo social.

Referencias

- Alfarrah, N., y Walraevens, K. (2018). Groundwater overexploitation and seawater intrusion in coastal areas of arid and semi-arid regions. *Water*, 10(2), 143.
- Alzate, D., Rojas, E., Mosquera, J., y Ramón, J. (2015). Cambio climático y variabilidad climática para el periodo 1981-2010 en las cuencas de los ríos zulía y pamplonita, norte de santander-colombia. *Luna Azul*(40), 127–153.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., y Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic press.
- Anuard, P.-G., Julián, G.-T., Hugo, J.-F., Carlos, B.-C., Arturo, H.-A., Edith, O.-T., y Claudia, Á.-S. (2019). Integration of isotopic (2h and 18o) and geophysical applications to define a groundwater conceptual model in semiarid regions. *Water*, 11(3), 488.
- Armendariz, C. A. R., Banning, A., Benavides, A. C., Díaz, Y. Z. E. O., y Larragoitia, J. C. (2022). Hydrogeochemistry of groundwater in zacatecas, mexico: A focus on arsenic, fluoride and uranium. En *2022 goldschmidt conference*.
- Avila-Sandoval, C., Júnez-Ferreira, H., González-Trinidad, J., Bautista-Capetillo, C., Pacheco-Guerrero, A., y Olmos-Trujillo, E. (2018). Spatio-temporal analysis of natural and anthropogenic arsenic sources in groundwater flow systems. *International journal of environmental research and public health*, 15(11), 2374.
- Bedient, P. B., Huber, W. C., Vieux, B. E., y cols. (2008). *Hydrology and floodplain analysis* (Vol. 816). Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
- Campos-Aranda, D. F. (1984). *Procesos del ciclo hidrológico*. UASLP.
- Campos-Aranda, D. F. (2010). *Introducción a la hidrología urbana*. Printego.
- Cázares Escareño, J., Júnez-Ferreira, H. E., González-Trinidad, J., Bautista-Capetillo, C., y Robles Rovelo, C. O. (2022). Design of groundwater level monitoring networks for maximum data acquisition at minimum travel cost. *Water*, 14(8), 1209.
- Centeno-García, E., Ruiz, J., Coney, P. J., Patchett, P. J., y Ortega-Gutiérrez, F. (1993). Guerrero terrane of mexico: Its role in the southern, cordillera from new geochemical data. *Geology*, 21(5), 419–422.
- Centeno-García, E., y Silva-Romo, G. (1997). Petrogenesis and tectonic evolution of central mexico during triassic-jurassic time. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 14(2), 244–260.
- Cigna, F., y Tapete, D. (2022). Land subsidence and aquifer-system storage loss in central mexico: A quasi-continental investigation with sentinel-1 insar. *Geophysical Research Letters*, 49(15), e2022GL098923.
- Clark, I. (2015). *Groundwater geochemistry and isotopes*. CRC press.
- CONAGUA. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero*

- de calera (3225) estado de zacatecas*. Ciudad de México.
- CONAGUA. (2019). *Estadísticas del agua en México*. Ciudad de México.
- CONAGUA. (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero de calera (3225) estado de zacatecas*. Ciudad de México.
- Conagua. (2022). *Numeragua 2022*. Ciudad de México.
- Córdoba, D. A., y Mora, L. S. (1989). Marco geológico del área de revolución-puerta de cabrera, estado de durango. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 8(2), 111–122.
- Custodio, E., Llamas, M. R., y cols. (1983). *Hidrología subterránea* (Vol. 1). Omega Barcelona.
- de Cserna, Z. (1976). Geology of the fresnillo area, zacatecas, mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 87(8), 1191–1199.
- FAO, B. R. M. (2008). Suelo: Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional. *Roma, Italy*.
- Freeze, R. A., y Cherry, J. A. (1977). *Groundwater*. Prentice-hall.
- García, E. (1964). *Modificaciones al sistema de clasificació köppen (para adaptarlo a las condiciones de la república mexicana)*. Ciudad de México.
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., y Arnold, J. G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211–1250.
- GEZ, S. d. a. d. a. (1993). *Informe técnico de la zona de calera, zac*. Zacatecas, Zacatecas.
- Gleick, P. H. (1993). *Water in crisis* (Vol. 100). New York: Oxford University Press.
- González-Trinidad, J., Pacheco-Guerrero, A., Júnez-Ferreira, H., Bautista-Capetillo, C., y Hernández-Antonio, A. (2017). Identifying groundwater recharge sites through environmental stable isotopes in an alluvial aquifer. *Water*, 9(8), 569.
- Harbaugh, A. W. (2005). *Modflow-2005, the us geological survey modular ground-water model: the ground-water flow process* (Vol. 6). US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA, USA.
- Hernández, J. E., Gowda, P. H., Howell, T. A., Steiner, J. L., Mojarro, F., Núñez, E. P., y Avila, J. R. (2012). Modeling groundwater levels on the calera aquifer region in central mexico using modflow. *Journal of Agricultural Science and Technology B*.
- Hölting, B., y Coldewey, W. G. (2019). *Hydrogeology*. Springer.
- IGH, I.-G. H. (2011). *Plan de manejo integral del acuífero calera, estado de zacatecas*. Zacatecas Mexico.
- Iglesias-Lopez, A., Ortiz-Villalobos, G., Rodriguez, R., y Minga, J. C. (2021). *Aguas subterráneas: Exploracion, evaluacion, caracterizacion y gestion*. Lima Peru.
- Imlay, R. W. (1936). Evolution of the coahuila peninsula, mexico. part iv geology of the western part of the sierra de parras:. *Geological Society of America Bulletin*, 47(4), 1091–1152.
- Imlay, R. W. (1938). Studies of the mexican geosyncline. *Bulletin of the Geological Society of America*, 49(11), 1651–1694.
- Inegi. (2004). *Guía para la interpretación de cartografía, edafología*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática Aguascalientes
- Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R. J., Rinaudo, J.-D., y Ross, A. (2016). *Integrated groundwater management*. Springer Nature.

- Júnez-Ferreira, H., González, J., Reyes, E., y Herrera, G. S. (2016). A geostatistical methodology to evaluate the performance of groundwater quality monitoring networks using a vulnerability index. *Mathematical Geosciences*, 48, 25–44.
- Júnez-Ferreira, H. E., Bautista-Capetillo, C. F., y González-Trinidad, J. (2013). Análisis geoestadístico espacial de cuatro iones mayoritarios y arsénico en el acuífero calera, zacatecas. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(1), 179–185.
- Kresic, N. (2006). *Hydrogeology and groundwater modeling*. CRC press.
- Krienen, L. (2018). *Understanding deep groundwater flow systems to contribute to a sustainable use of the water resource in mexican altiplano* (Tesis Doctoral no publicada). RWTH-Aachen University.
- Ledezma-Guerrero, O. (1967). *Resumen de la geología de la hoja parras*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- León González, N. T. (2020). *Modelo numérico de flujo de agua subterránea y estrategias de gestión hídrica del acuífero administrativo de salinas de hidalgo, san luis potosí* (Tesis de Master no publicada). Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Lillo, J. (2003). Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas. *Grupo de Estudios de Minería y Medio Ambiente*.
- Machiwal, D., y Jha, M. K. (2012). *Hydrologic time series analysis: theory and practice*. Springer Science & Business Media.
- Maity, R., y Maity. (2018). *Statistical methods in hydrology and hydroclimatology* (Vol. 555). Springer.
- Margat, J., y Van der Gun, J. (2013). *Groundwater around the world: a geographic synopsis*. Crc Press.
- Miao, Z., Brusseau, M., Carroll, K. C., Carreón-Diazconti, C., y Johnson, B. (2012). Sulfate reduction in groundwater: characterization and applications for remediation. *Environmental geochemistry and health*, 34, 539–550.
- Mijares, F. J. A. (2015). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa.
- Mitchell, J. M. (1976). An overview of climatic variability and its causal mechanisms. *Quaternary Research*, 6(4), 481–493.
- Mojarro Dávila, F., De León Mojarro, B., Júnez Ferreira, H. E., y Bautista Capetillo, C. F. (2013). *Agua subterránea en zacatecas*. Zacatecas, México.
- Naghetini, M. (2017). *Fundamentals of statistical hydrology*. Springer.
- Navarro, O., González, J., Júnez-Ferreira, H., Bautista, C.-F., y Cardona, A. (2017). Correlation of arsenic and fluoride in the groundwater for human consumption in a semiarid region of mexico. *Procedia Engineering*, 186, 333–340.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., y Williams, J. R. (2005). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005* (Inf. Téc.). Texas Water Resources Institute.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., y Williams, J. R. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009* (Inf. Téc.). Texas Water Resources Institute.
- Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., y Camprubí Cano, A. (2005). La mesa central de méxico: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica mexicana*, 57(3), 285–318.

- Noriega, R. D., Álvarez, J. P. F., y Álvarez, L. Á. (s.f.). Estudio comparativo de los simuladores de flujo subterráneo visual modflow y feflow 6.0 comparative study of groundwater simulation tools visual modflow and feflow.
- Nuñez Peña, E. P. (2003). *El acuífero de calera, zacatecas, situación actual y perspectivas para un desarrollo sustentable* (Tesis de Master no publicada). Universidad Autónoma de Nuevo León.
- O'Hogain, S., y McCarton, L. (2018). A technology portfolio of nature based solutions. *A Technology Portfolio of Nature Based Solutions: Innovations in Water Management*.
- Pachecho-Guerrero, A. I. (2020). *Evaluación de las pérdidas de transmisión y su efecto en la recarga de agua subterránea* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Peñuela Arévalo, L. A., y Carrillo Rivera, J. J. (2013). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la mesa central, México. *Investigaciones geográficas*(81), 18–32.
- Phan, T. D., Bertone, E., y Stewart, R. A. (2021). Critical review of system dynamics modelling applications for water resources planning and management. *Cleaner Environmental Systems*, 2, 100031.
- Price, M., y Back, W. (2013). *Introducing groundwater*. Routledge.
- Rocha Escalante, H. (2009). *Estrategias para el desarrollo sustentable de los sistemas de flujo en el acuífero de río verde, s.l.p.* (Tesis de Master no publicada). Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Rubio Arellano, A. B. (2021). *Modelación de la dinámica del agua subterránea del acuífero valle de celaya* (Tesis de Master no publicada). Instituto de investigación Científica y Tecnológica.
- Shanfield, M., y Cook, P. G. (2014). Transmission losses, infiltration and groundwater recharge through ephemeral and intermittent streambeds: A review of applied methods. *Journal of Hydrology*, 511, 518–529.
- Singh, A. (2014). Groundwater resources management through the applications of simulation modeling: A review. *Science of the Total Environment*, 499, 414–423.
- Sisay, B. M., Nedaw, D., Birhanu, B., y Gigar, A. G. (2023). Application of swat and modflow models for characterization of surface-groundwater interaction in the modjo river catchment, central ethiopia. *Environmental Earth Sciences*, 82(13), 341.
- Tarbut, E. J., Lutgens, F. K., y Tasa. (2005). *Ciencias de la tierra* (Vol. 1). Pearson Educación Madrid.
- Tóth, J. (2009). *Gravitational systems of groundwater flow: theory, evaluation, utilization*. Cambridge University Press.
- Tristán-González, M., Torres Hernández, J. R., Labarthe-Hernández, G., Aguilón-Robles, A., y Yza-Guzmán, R. (2012). Control estructural para el emplazamiento de vetas y domos félsicos en el distrito minero de zacatecas, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(3), 353–367.
- Wang, H. F., y Anderson, M. P. (1995). *Introduction to groundwater modeling: finite difference and finite element methods*. Academic Press.
- Wang, Y., y Chen, N. (2021). Recent progress in coupled surface-ground water models and their potential in watershed hydro-biogeochemical studies: A review. *Watershed Ecology and the Environment*, 3, 17–29.

- WHO. (2011). Guidelines for drinking-water quality. *WHO chronicle*, 38(4), 104–8.
- Woessner, W. W., y Eileen, P. P. G. (2020). *Hydrogeologic properties of earth materials and principles of groundwater flow*. Canadá: Groundwater Project.
- Woessner, W. W., y Poeter, E. P. (2020). Hydrogeologic properties of earth materials and principles of groundwater flow. *Cherry, J., Eileen, P., Eds.*
- Zhou, Y., y Li, W. (2011). A review of regional groundwater flow modeling. *Geoscience frontiers*, 2(2), 205–214.