



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Modelo Hidrogeológico del Valle
de San Juan Bautista Londó, Baja
California Sur, México.**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Eduardo Alfredo García Zamorano

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Rosa María Prol Ledesma



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

Agradecimientos

Gracias al universo que me permitió estudiar en la Universidad en la que desde niño soñaba con estar, rodeado de gente bella y con mucho valor humano.

A mi amada Universidad, la máxima casa de estudios de este país, y con la cual no podría estar más agradecido. Sin duda, es una puerta hacia un sinfín de posibilidades.

A mi mamá, que estuviste conmigo en cada una de las etapas para llegar aquí y que siempre estás cuando te necesito y sé que así será siempre. Este logro es gracias a tu amor, esfuerzo y dedicación. El camino a penas comienza aquí, te aseguro que te sentirás más orgullosa de mí, te amo.

A mi papá, que siempre has tenido esa fuerza para seguir en la vida para construir lo suficiente para que nunca me faltara nada. No habría podido conseguir esta meta en particular, sin tu incansable apoyo, ni tu comprensión hacia mis metas. Te amo y sé que me has valorado mucho, no te voy a fallar.

A mi hermano, que más que un hermano eres un gran ejemplo para mí en muchos aspectos de la vida. Realmente, eres una fuerza impulsora para mi persona y tu valentía me hace siempre querer superarme más y más. Te amo Albert.

A mi Abuelita Male y a mi Abuelita Lolita, siempre las llevo conmigo y se que ustedes siempre van conmigo a donde sea que decida ir. Las amo mucho.

A mi tío Germán, siempre has visto por mí y te quiero mucho por ser una persona responsable y honesta como pocas en el mundo.

A mi tía Ale y a mi tío Juan Carlos, quienes siempre me han hecho ver que cada esfuerzo invertido te define como persona.

A mi tía Rosi, por ser quien eres con esa nobleza y lealtad que te caracteriza y de donde he aprendido lo más que he podido.

A Chiro, me mantuviste con los pies en la tierra todo este tiempo y me hizo encontrarme con muchas cualidades que antes me parecían ajenas. Muchas de tus palabras se ven traducidas en este trabajo, eres una inspiración para mí. Te amo.

Olán, siempre he apreciado todo el esfuerzo que has dedicado, esfuerzo del cual he aprendido mucho y siempre voy a valorar. Te quiero amigo.

A los cocorinos, que siempre están cuando los necesito, siempre los llevaré en mi corazón, los amo.

Gracias por todos esos amigos que esta universidad me dio, gente que quiero y aprecio mucho, y que siempre llevo una parte de ellos.

Al director de esta tesis, Dr. Fernando Javier Guerrero Martínez, que en su calidad de Investigador Posdoctoral del Instituto de Geofísica UNAM está impedido para registrarse como director ante la Facultad de Ingeniería:

Debo agradecer todo el tiempo que me has dedicado. Tengo que reconocer que has sido un maestro muy paciente conmigo, además de ser alguien muy honesto y franco, eso es algo que agradeceré infinitamente. Tus enseñanzas valen mucho para mí y siempre las llevaré en mi vida profesional.

A los sinodales:

Ing. Martín, a usted le debo agradecer que más allá de compartirme su conocimiento, me enseñó que la ingeniería es un camino de muchas brechas pero que siempre la más práctica será la mejor. Quisiera agradecerle también su confianza para compartirme siempre su propia perspectiva de la ingeniería, la cual me ayudó a construir mi propio criterio.

A Mario, quisiera agradecerte tu tiempo y tu permanencia en este proyecto es algo que agradezco mucho. Sin duda, tus comentarios acertados y tu conocimiento le dieron forma a este trabajo.

Dr. Padilla, le agradezco su tiempo y entrega porque entiendo que para usted el tiempo dedicado a cada uno de sus alumnos es muy valioso y eso es algo de lo que cualquier estudiante se debe sentir muy agradecido.

Ing. Rubio, le agradezco sus enseñanzas desde el aula, ya que me ayudaron a mejorarme como ingeniero y me inspiraron para desear mucho más de lo que tenía pensado para mi futuro.

Al Dr. Augusto, que a pesar de que la invitación para participar en este trabajo fue repentina, usted mostró su apoyo al aceptar, y que además sus comentarios a la tesis fueron de gran valor. Por otro lado, es también de agradecer que usted siempre tenía la disponibilidad para sus alumnos y eso se veía reflejado en lo abarrotado que estaba siempre su cubículo.

A la Dra. Rosa María Prol, la Mtra. Marcela Errasti y a todo el Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica por su permanente disponibilidad, sus ganas de enseñar, ya que desde el primer momento que llegué con ustedes me recibieron con los brazos abiertos. Agradecerles por su colaboración al proyecto con la información de las muestras geoquímicas que muestrearon en campo. Mi enorme aprecio hacia todos ustedes.

Al Dr. Rodrigo, por haber aceptado ser parte del Comité de Titulación a pesar de el escaso tiempo que se te ofreció para poder revisar mi tesis. Gracias por aceptar a formar parte de mi titulación.

A los académicos:

Al Dr. Guillermo Hernández por su inmensa amabilidad y su apoyo por incluirme en sus clases y en sus seminarios, los cuales fueron de gran ayuda. Mi más grande respeto hacia usted como profesor y como persona.

Al Ing. Arias Paz, quien fue un pilar en mis conocimientos de Hidrogeología. Sé que habría participado con comentarios en este trabajo, de haberse dado la oportunidad. En donde se encuentre, usted representa un ejemplo a seguir como hidrogeólogo y estoy seguro de que no soy el único que piensa así.

“La imaginación es más importante que el conocimiento. El conocimiento es limitado y la imaginación circunda al mundo.” Albert Einstein.

Índice general

1. Generalidades	13
1.1. Justificación	13
1.2. Objetivo	14
1.2.1. Objetivo general	14
1.2.2. Objetivos específicos	14
1.3. Metodología	15
1.4. Antecedentes	15
1.5. Localización y vías de comunicación	22
1.6. Geografía	23
1.6.1. Clima	23
1.6.2. Fisiografía	25
1.6.3. Geomorfología	26
2. Marco Geológico	28
2.1. Geología Regional	28
2.2. Marco Tectónico Regional	29
2.3. Estratigrafía	35
2.3.1. Basamento	38
2.3.2. Generalidades de los Grupos Pre-Comondú y Comondú	38
2.3.3. Grupo Pre-Comondú	39
2.3.4. Grupo Comodú	39
2.3.5. Formación Salada	40
2.3.6. Complejo Volcánico Mancenares	41
2.3.7. Piedemonte y abanicos aluviales	41
2.3.8. Aluvión	42
2.4. Sistemas Estructurales	42
3. Modelo conceptual del Acuífero de San Juan Bautista Londó	50
3.1. Dominio y geometría del sistema	50
3.2. Condiciones de frontera	51
3.3. Geoquímica	52
3.3.1. Calidad del agua subterránea	52
3.3.2. Definición de los sistemas jerárquicos de flujo subterráneo	53
3.3.3. Diagrama de Piper Hill Langellier	59
3.4. Elevación y Profundidad del nivel estático	61

3.5. Unidades hidroestratigráficas	63
3.6. Parámetros hidráulicos	65
3.7. Identificación de fuentes y/o sumideros	67
3.8. Balance de aguas subterráneas	68
3.8.1. Entradas	69
3.8.2. Salidas	77
3.9. Supuestos básicos del modelo conceptual	80
3.10. Modelo Matemático	81
3.10.1. Ecuación de continuidad en estado estacionario	82
3.10.2. Ecuación general del flujo subterráneo en estado estacionario	84
3.10.3. Ecuación de flujo en estado transitorio	85
4. Modelación matemática y computacional del flujo subterráneo en el Valle de San Juan Bautista Londó	86
4.1. Documentación	86
4.1.1. Mapa Geológico e información topográfica	86
4.1.2. Estratigrafía	87
4.1.3. Geología Estructural	87
4.1.4. Visualización de fallas estructurales en el modelo	89
4.2. Construcción del Modelo Conceptual en tres dimensiones (3D)	92
4.3. Generación del Modelo Numérico	107
4.3.1. Definición de celdas activas e inactivas	107
4.3.2. Condiciones de frontera del modelo numérico	109
4.3.3. Parámetros hidráulicos	111
4.3.4. Calibración en estado estacionario	112
5. Resultados y Discusiones	116
5.1. Piezometría	116
5.2. Dinámica del flujo del acuífero	118
5.3. Dinámica de los sistemas jerárquicos del flujo subterráneo	127
6. Conclusiones y Recomendaciones	132
6.1. Conclusiones	132
6.2. Recomendaciones	134

Índice de figuras

1.1.	Mapa que muestra la extensión del Acuífero de SJBL y Loreto.	16
1.2.	Mapa de Localización de la zona de estudio.	23
1.3.	Localización de las estaciones meteorológicas para el análisis del clima en la zona de SJBL.	24
1.4.	Provincias de BCS (Tomado de Comisión Estatal del Agua, 2015).	26
2.1.	Columna estratigráfica regional.	29
2.2.	Evolución en la distribución de las Placas Farallón, Pacífico y de Norteamérica durante el Paleógeno (Paleoceno-Oligoceno). Se denota la subducción de la Placa Farallón por debajo de la Norteamericana. (Fragmento de imagen de Atwater, 2011).	30
2.3.	Esquema de “rollback”; la disminución de ángulo de una Placa en subducción.	31
2.4.	Evolución tectónica del margen occidental y oriental en la microPlaca de Baja California. A) Se muestra las Placas residuales de la Placa Farallón (producto de la subducción oblicua de la Placa Farallón) y el cambio de un margen convergente a un margen transformante (comenzando desde el norte, donde la Placa Farallón quedó completamente subducida) entre la Placa del Pacífico y la de Norteamérica. B) El margen a lo largo de la región de Baja California queda como un margen transformante y al este da comienzo un régimen extensivo. C) El margen transformante disminuye y se extiende el margen divergente al sur de la Península, formando el sistema de dorsales conectadas por fallas transformantes (Fletcher et al., 2007).	33
2.5.	Sección esquemática tomada y modificada de Fletcher et al. 2007. Muestra en tres etapas la evolución del límite de Placas entre Norteamérica y pacífico y la Placa subducida Farallón. A) La dorsal del pacífico se aproxima a la trinchera, donde la Placa Farallón subduce. B) Se crea una ventana astenosférica por el rompimiento de la Placa subducida Farallón y la anomalía térmica acreciona con la parte inferior de la Placa norteamericana. C) La ventana astenosférica sirve como conducto para la porción de astenósfera que antiguamente ascendía por la dorsal. Se forma el proto golfo por la descompresión de la astenósfera.	34
2.6.	Mapa del Valle de San Juan B. Londó.	36
2.7.	Columna estratigráfica.	37

2.8. Representación del Graben tectónico de SJBL (Modificado por Rodríguez-Díaz (2009) de Casarrubias-Uzeta et al., 1994).	43
2.9. Ilustración extraída de Zanchi (1994), muestra los tres eventos de evolución de la apertura del proto golfo. 1) Sistema extensivo, tras el emplazamiento de diques. 2) Sistema extensivo y Formación de lineamientos NO-SE, tras la apertura del proto golfo californiano. 3) Régimen trans-tensivo, tras la reactivación del sistema de fallas formado durante la apertura del protogolfo (Zanchi, 1994).	45
2.10. Mapa que muestra las secciones de la zona de estudio, Valle de SJBL, BCS.	46
2.11. Sección 1.	47
2.12. Sección 2.	47
2.13. Sección 3.	48
2.14. Sección 4.	48
2.15. Sección 5.	48
2.16. Sección 6.	49
3.1. Área de estudio y acuíferos contiguos.	51
3.2. Condiciones de Frontera del Valle de SJBL.	52
3.3. Sistemas jerárquicos de flujo subterráneo.	55
3.4. Gráfica de iones mayores contra temperatura de las muestras de agua (IGF, 2015).	57
3.5. Diagrama Piper para las muestras de IGF (2015).	60
3.6. Profundidad del Nivel estático en SJBL (IGF, 1986).	62
3.7. Elevación del Nivel estático en SJBL (IGF, 1986).	62
3.8. Profundidad del Nivel estático en SJBL (Lesser, 2006).	63
3.9. Elevación del Nivel estático en SJBL (Lesser, 2006).	63
3.10. Esquema de la disposición de las unidades hidroestratigráficas en el Valle de SJBL.	65
3.11. Censo de aprovechamientos de agua (REPDA).	68
3.12. Cálculo de Flujos subterráneos para el año 1986.	72
3.13. Cálculo de Flujos subterráneos para el año 2006.	75
3.14. Resumen de Balance del Acuífero de SJBL para el año 1986.	79
3.15. Resumen de Balance del Acuífero de SJBL para el año 2006.	80
3.16. Modelo Conceptual del Valle de SJBL.	81
3.17. Balance de flujo en un volumen de control.	83
4.1. Se pueden observar las Fallas de La Giganta, Falla Loreto y la Falla del valle que denota al graben.	89
4.2. Vista de de canto de la línea de costa.	90
4.3. Se observa la falla al oeste del valle que limita al graben y las fallas asociadas al origen del Complejo Volcánico Mencenares.	90
4.4. Se observa el Grupo Salada de forma aislada y las fallas de Loreto y la falla oriental del graben.	91

4.5. Se observa únicamente al Grupo Comondú y a las fallas que cortan a las secuencias y basamento profundo.	91
4.6. Se observa la zona del Basamento cortada por las fallas más importantes del graben.	92
4.7. Se muestra el Modelo Digital de Elevación junto con los contactos de las litologías proyectadas al DEM.	93
4.8. Secciones guía que se identifican con líneas negras proyectadas por arriba del DEM.	93
4.9. Demostración de la creación de las bases de las capas y los planos de falla en rojo.	94
4.10. Construcción del modelo conceptual. Se muestran las bases de cada una de las unidades litológicas: En azul se observa la unidad de aluvión, en verde la unidad de Piedemonte, la amarilla la Formación Salada, la morada el Complejo Volcánico Mecenares, la café el Grupo Pre-Comondú y la verde oscuro el basamento.	94
4.11. Unión de la unidad Aluvión y Piedemonte y Abanicos Aluviales para simplificar el modelo.	95
4.12. Exportación de superficies.	95
4.13. Clasificación de los diferentes tipos de horizontes de acuerdo con Visual MODFLOW Flex. (Tomado del tutorial del Visual Modflow Flex).	96
4.14. Red de puntos de la unidad Aluvión. La línea roja representa el límite del área de estudio, el fondo color verde denota las áreas de extensión del aluvión. El fondo blanco representa las áreas donde el aluvión trunca o se acuña, que son las áreas donde se agregaron los puntos adicionales con valores constantes en el eje z.	97
4.15. Abrir un nuevo proyecto.	97
4.16. Creación de nuevo proyecto.	98
4.17. Iniciar creación del modelo.	98
4.18. Primer paso de la creación del modelo.	99
4.19. Importación de los archivos por medio de la opción “Import Data”.	99
4.20. Importación de la superficie topográfica.	100
4.21. Importación de un polígono.	100
4.22. Importación de los archivos de tipo punto.	101
4.23. Configuración de importación de archivos tipo punto.	101
4.24. Configuración de importación de archivos tipo punto.	102
4.25. Archivos cargados tipo punto.	102
4.26. Creación de superficies.	103
4.27. Selección del archivo a interpolar.	103
4.28. Configuración de la interpolación.	104
4.29. Abrir visualizador de superficies en 3 dimensiones.	104
4.30. Visualización de superficies en 3D.	105
4.31. Selección de archivo para delimitar el área del modelo.	105
4.32. Horizontes seleccionados, de los archivos de superficie creados.	106
4.33. Selección del tipo de horizonte.	106
4.34. Previa del modelo conceptual.	106

4.35. Visualización de la creación del modelo conceptual por zonas.	107
4.36. Definición de celdas para las capas 1, 2, 3 y 4.	108
4.37. Definición de celdas para la capa 5.	109
4.38. Condiciones Tipo 1.	110
4.39. Condiciones Tipo 2.	111
4.40. Unidades hidrogeológicas por conductividades hidráulicas.	112
4.41. Diagrama de flujo para la calibración.	113
4.42. Cargas Calculadas vs Cargas Observadas.	114
5.1. Mapa de Cargas hidráulicas con direcciones de flujo.	117
5.2. Mapa de Cargas hidráulicas con aprovechamientos.	118
5.3. Mapa de Cargas hidráulicas con aprovechamientos.	119
5.4. Sección hidrogeológica A.	121
5.5. Sección hidrogeológica B.	122
5.6. Sección hidrogeológica C.	123
5.7. Sección hidrogeológica D.	124
5.8. Sección hidrogeológica E.	125
5.9. Sección hidrogeológica F.	126
5.10. Sistemas jerárquicos del flujo subterráneo (Sección C).	129
5.11. Sistemas jerárquicos del flujo subterráneo (Sección D)	130
5.12. Sistemas jerárquicos del flujo subterráneo (Sección F)	131

Índice de tablas

1.1.	Datos reportados por dicho estudio (Recopilados por Lesser, 2006).	16
1.2.	Dato reportado por dicho estudio (Recopilado por Lesser, 2006).	17
1.3.	Datos reportados por dicho estudio (Recopilados por Lesser, 2006).	17
1.4.	Datos reportados por dicho estudio (Recopilados por Lesser, 2006).	18
1.5.	Datos reportados por dicho estudio (Recopilados por Lesser, 2006).	18
1.6.	Datos extraídos del estudio, (Recopilados de Lesser, 2006)	19
1.7.	Datos reportados por dicho estudio (Recopilados por Lesser, 2006)	20
1.8.	Datos del Valle de SJBL, tomados de Lesser (2006).	21
1.9.	Datos de San Bruno, tomados de Lesser (2006).	21
1.10.	Registro y descripción de las unidades reportadas por Arroyo (2018).	22
1.11.	Media anual de preipitación de los años 2001 al 2019.	25
3.1.	Balance iónico de las muestras del IGF (2015).	56
3.2.	Asignación de sistema de flujo subterráneo a las muestras del IGF.	59
3.3.	Cálculo de la conductividad hidráulica a partir de la Ecuación (3.2).	66
3.4.	Parámetros hidráulicos para las diferentes unidades hidroestratigráficas del Valle de SJBL.	67
3.5.	Volumen concesionado y usos de los aprovechamientos reportados por REPDA.	67
3.6.	Cálculo de entrada por flujo subterráneo horizontal en el Valle de SJBL, BCS para el año 1986.	73
3.7.	Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal en el Valle de SJBL, BCS para el año 1986.	74
3.8.	Cálculo de entrada por flujo subterráneo horizontal en el Valle de SJBL, BCS para el año 2006.	76
3.9.	Cálculo de entrada por flujo subterráneo horizontal para San Bruno, BCS para el año 2006.	76
3.10.	Resumen del balance de aguas subterráneas del Valle de SJBL y de San Bruno para el año 1986 y 2006.	78
4.1.	Conductividades hidráulicas de cada unidad hidrogeológica.	112
4.2.	Conductividades hidráulicas de cada unidad hidrogeológica.	115
4.3.	Conductividades hidráulicas de cada unidad hidrogeológica.	115

Capítulo 1

Generalidades

1.1. Justificación

El agua es un recurso imprescindible para la vida, y debe ser vista como tal. Al ser un recurso tan importante nos vemos en la necesidad de fomentar una cultura para su preservación. El cuidado no solo comprende su uso racional, sino que atiende también a todo el ciclo integral por el que atraviesa, el cual comprende el abastecimiento, saneamiento y depuración de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)¹. De acuerdo con la Estadística Nacional del Agua (EAM) 2018², el agua renovable es aquella que es factible explotar de manera sustentable en una región sin alterar el ecosistema. Se ha estimado que México cuenta con 451 585 hm³ de agua renovable al año. Si esta cifra la dividimos entre el número total de habitantes del país, obtendremos la cantidad de agua que cada habitante puede consumir al año. A esta cifra se le llama valor per cápita. La Comisión Nacional del Agua estimó que durante el 2017 el valor per cápita en México fue de 3656 m³/hab, lo que equivale a 10 016 litro/hab./día. De acuerdo con esta cifra, México ocupa el lugar 94 de 200 países registrados en valor per cápita. Islandia ocupa el primer lugar con 516 090 m³/hab./año². Cuando el valor per cápita cae por debajo de 1700 m³/hab./año se considera al país o región en condiciones de estrés hídrico. Cuando cae por debajo de los 1000 m³/hab./año se habla de escasez de agua. Finalmente, por debajo de los 500 m³/hab./año se considera una escasez absoluta². Las causas de la escasez son las siguientes: 1. La reducida disponibilidad de agua potable cerca de los centros urbanos, 2. La contaminación de mantos acuíferos por la actividad humana, 3. La falta de políticas públicas orientadas a un manejo eficiente del recurso. Aunado a esto se debe considerar que el crecimiento poblacional conduce a una demanda creciente del recurso. En México estas situaciones se han manifestado en una reducción del valor per cápita, de 1970 a 2017, con más de 7000 m³/hab./año. Es evidente que entre mayor sea la población, mayores volúmenes de agua serán requeridos para abastecer el consumo personal. Adicionalmente, los volúmenes de agua requeridos para abastecer la producción de alimentos, servicios y productos de una mayor población también aumentarán. Para contabilizar dichos volúmenes se ha definido el término

¹Comisión Nacional Del Agua. 2017. Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. México.

²Comisión Nacional de Agua. 2018. Estadística Nacional del Agua (EAM), México.

huella hídrica, el cual hace referencia al volumen total de agua dulce usado para producir bienes y servicios. Mientras que a la cantidad de agua empleada para producir bienes agrícolas o industriales específicos se le denomina *agua virtual*³. Un problema particular de México es que de los 653 acuíferos existentes en el país, 106 acuíferos se encuentran sobreexplotados⁴. Esta situación puede deberse a la reducida disponibilidad de agua potable cerca de los centros urbanos, ya que el 77 % de la población en México radica en zonas consideradas como áridas y semiáridas, las cuales solo disponen de un tercio del agua renovable del país⁵. La Península de Baja California es un ejemplo de esta cuestión, ya que representa la región más seca del país, con una precipitación anual de 149.9 mm/año en 2017. En particular, el estado de Baja California Sur (BCS) posee 39 acuíferos, de los cuales 14 se encuentran en condiciones de sobreexplotación⁶. Considerando que el 96 % del agua que utilizan los habitantes de dicho estado para fines económicos es de origen subterráneo, es imperante promover el monitoreo y preservación de sus acuíferos. La dificultad que vive el estado de BCS denota la importancia de la evaluación y monitoreo de los recursos hídricos de los acuíferos, y el desarrollo de modelos de flujo de agua subterránea. Dichos modelos son una representación teórica del sistema acuífero y consisten en tres etapas: 1. El modelo conceptual, el cual consiste en definir la extensión, geometría, relaciones estructurales y caracterización de las unidades litológicas. Esto permite tener un entendimiento físico del sistema. 2. El modelo matemático, el cual expresa las ecuaciones que gobiernan la física del sistema y permite relacionar las propiedades físicas del sistema de manera cuantitativa. 3. El modelo numérico computacional, el cual consiste en un método para resolver el modelo matemático.

1.2. Objetivo

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo hidrogeológico del Valle de San Juan Londó que sirva como herramienta de análisis para el aprovechamiento sustentable del recurso hídrico.

1.2.2. Objetivos específicos

- Elaborar un modelo conceptual que comprenda la geología y la hidrogeología del Valle de San Juan Bautista Londó (SJBL).
- Definir el modelo matemático que describa el flujo subterráneo.
- Desarrollar el modelo numérico en la herramienta computacional MODFLOW.

³Fondo para la correcta toma de decisiones. 2015. Agua y Medio Ambiente: Un prontuario para la correcta toma de decisiones. México.

⁴Comisión Nacional Del Agua. 2016. Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. México

⁵Comisión Nacional del Agua. 2018. Numeragua, México.

⁶Comisión Nacional Del Agua. 2017. Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. México.

- Llevar acabo la calibración y validación del modelo para la simulación.
- Analizar y procesar los resultados de la simulación del modelo.

1.3. Metodología

Para concretar los objetivos planteados se seguirá la metodología descrita a continuación. El primer paso consiste en la elaboración del modelo conceptual, para ello se consultarán diversas fuentes y se recopilarán datos de la geología de la zona de interés, así como también datos del Acuífero de SJBL que permitan definir el modelo conceptual hidrogeológico. Una vez procesada la información recopilada se creará un modelo en computadora con la herramienta “Move”, que reúna las características del área de estudio de manera cuantitativa y simplificada. Más adelante, se explicarán las ecuaciones que gobiernan el flujo subterráneo. Posteriormente, se acoplará el modelo conceptual a un modelo numérico a partir de la creación de una malla construida con la herramienta MODFLOW. Al estar formado el modelo numérico se ingresan los valores de entrada al modelo para calibrarlo y validarlo. Finalmente, se estudiarán los resultados y se hará un diagnóstico para un aprovechamiento sustentable del sistema acuífero estudiado.

1.4. Antecedentes

El Valle de San Juan Bautista Londó (SJBL) está comprendido en un área de 600 km² y pertenece al Acuífero San Juan Bautista Londó (Figura 1.1). La zona es de suma importancia debido a que los poblados cercanos se abastecen de los recursos hídricos del área para uso doméstico y para uso agrícola. Por eso mismo, diversos estudios hidrogeológicos se han realizado desde hace cuatro décadas y son la base para el desarrollo y calibración del modelo hidrogeológico. A continuación se presentan trabajos realizados en el Valle de SJBL.

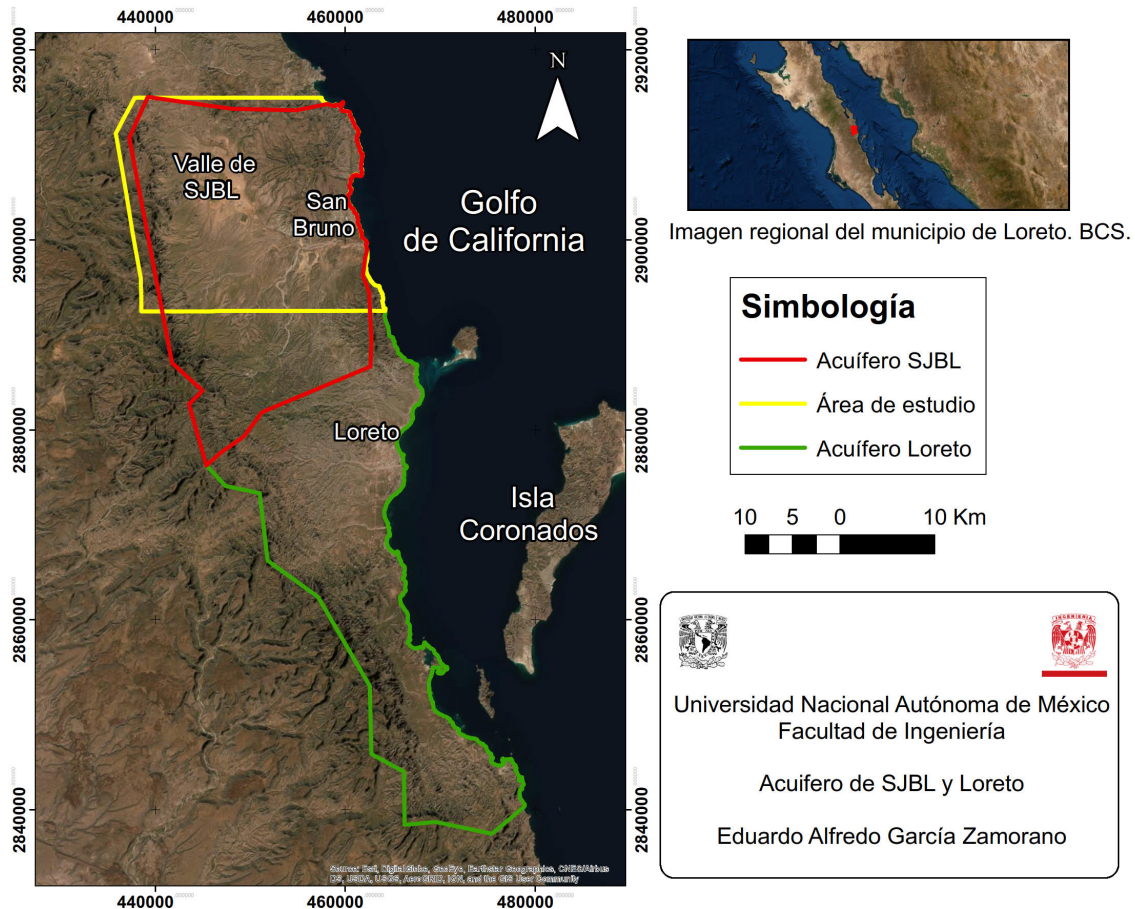


Figura 1.1: Mapa que muestra la extensión del Acuífero de SJBL y Loreto.

El estudio titulado: **“Informe final del estudio geohidrológico preliminar de San Juan B. Londó Municipio de Comondú, Estado de Baja California Sur”**, elaborado por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) dentro del Programa PIDER en el año de 1978. En él se menciona el censo de pozos, nivelación de brocales, hidrometría, análisis químicos, pruebas de bombeo, exploraciones directas, geología, descripción climatológica, así como la descripción de la hidrología subterránea, incluyendo un balance de agua subterránea. La Tabla 1.1 presenta los registros de este estudio de acuerdo con Lesser (2006).

Tabla 1.1: Datos reportados por dicho estudio (Recopilados por Lesser, 2006).

Aprovechamientos	62
Entrada por flujo subterráneo	10.55 hm ³ /año
Salida subterránea	2.55 hm ³ /año
Cambio de almacenamiento	-1.10 hm ³ /año
Extracción	10.87 hm ³ /año
Recarga	12.35 hm ³ /año
Abatimiento medio anual (zona agrícola)	1.52 m

“**Estudio Geohidrológico de Loreto**”, elaborado por Ingeniería Integral, S.A. de C.V. para Fondo Nacional de Fomento al Turismo (FONATUR), en el año de 1980. El trabajo incluye una descripción geológica del área de Loreto y un análisis hidrogeológico general, además de sondeos eléctricos de resistividad. Reporta problemas de escasez de agua y clasifica el recurso hídrico como no renovable. La información de geofísica registró un cuerpo acuífero superficial y un cuerpo acuoso profundo, asociado con agua salada y arcillas de muy baja permeabilidad. Cabe destacar el parámetro de transmisividad que este estudio reporta (Tabla 1.2).

Tabla 1.2: Dato reportado por dicho estudio (Recopilado por Lesser, 2006).

Transmisividad	0.3 a 2.0×10^{-3} m ² /seg
----------------	--

“**Actualización del Estudio Geohidrológico de la cuenca de Loreto-Puerto Escondido, municipio de Comondú, en el Estado de Baja California Sur**”, elaborado por Aquaplan, S.A. para SARH en el año de 1981. Este informe incluyó una descripción geológica, un censo de aprovechamientos, análisis químicos, nivelación topográfica y pruebas de bombeo, planos de piezometría, volúmenes de extracción y descarga natural de agua subterránea. Cabe destacar que en sus fronteras definen a la Formación Comondú como barrera de flujo subterráneo y que la mayor parte de las captaciones se encuentran en los materiales aluviales. Reporta además que la calidad del agua se ve mermada cercana a la costa por una intrusión marina. Este estudio registró lo siguiente (Tabla 1.3):

Tabla 1.3: Datos reportados por dicho estudio (Recopilados por Lesser, 2006).

Aprovechamientos (Loreto)	105 (13 pozos, 88 norias y 4 sondeos)
Extracción	2.153 hm ³ /año
Transmisividad	1×10^{-3} m ² /seg
Coefficiente de almacenamiento	0.1 a 0.2
Extracción	1.54 hm ³ /año
Abatimiento medio anual	-0.32
Cambio de almacenamiento	-0.16 hm ³ /año
Extracción	1.7 hm ³ /año
Recarga total	1.54 hm ³ /año

“**Análisis del comportamiento de los acuíferos del desarrollo turístico de Loreto, BCS**”, elaborado por Impresora y Encuadernadora Progreso S.A. (IEPSA) para FONATUR en el año de 1984. El trabajo reporta las características hidrogeológicas, un análisis hidrometeorológico superficial y un modelo simplificado del acuífero. Reporta 40 sondeos eléctricos verticales calibrados con 9 cortes litológicos de pozos, con el fin de delimitar las unidades granulares, así como también 7 pruebas de bombeo y un balance de agua subterránea. Se concluyó que el hecho de que el abatimiento del nivel estático no fuera progresivo durante 1981 a 1985, permitía suponer que la recarga era mayor a lo que se había estimado.

Sugiere restringir la explotación a una distancia mínima de 1.5 km de la costa para evitar la intrusión marina. Expresa la posibilidad de aumentar en $1 \text{ hm}^3/\text{año}$ la extracción (área de Nopoló), menciona que el costo de las construcciones de obras de recarga no justificaría el beneficio. Además, este estudio registró datos del acuífero, así como su transmisividad (Tabla 1.4).

Tabla 1.4: Datos reportados por dicho estudio (Recopilados por Lesser, 2006)

Abastecimientos (Loreto 1984)	1 pozo, una noria (45 lps), y dos pozos de FONATUR (12 lps) como suplementarios.
Censo	13 pozos, 25 norias y 5 manantiales.
Transmisividad	$1.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg}$
Entrada por flujo horizontal	$1.45 \text{ hm}^3/\text{año}$
Salida por flujo horizontal	$1.28 \text{ hm}^3/\text{año}$
Extracción por bombeo	$1.64 \text{ hm}^3/\text{año}$
Recarga vertical	$1.47 \text{ hm}^3/\text{año}$
Recarga total	$2.92 \text{ hm}^3/\text{año}$

“Estudio Geohidrológico-Geofísico en la cuenca de San Juan Bautista Londó, Municipio de Comondú, Municipio de Comondú, B.C.S.”, elaborado para la SARH, por el Instituto de Geofísica (IGF) de la UNAM en el año de 1986. El estudio realiza una descripción geológica y de unidades hidroestratigráficas: depósitos recientes (acuífero libre), Pleistoceno clástico (acuífero), Plio-pleistoceno volcánico (parcialmente confinante), Grupo Salada (acuífero), Formación Comondú (parcialmente confinante) y basamento granítico. Se realizaron además censos de 80 aprovechamientos (41 pozos), 10 pruebas de bombeo, levantamiento geofísico (gravimetría, magnetometría y prospección eléctrica). Los estudios geofísicos permitieron el entendimiento del sistema estructural del , el cual está comprendido por un hundimiento por fallamiento regional con un basamento localizado entre 1.6 y 2.2 km de profundidad. Los parámetros hidráulicos subterráneos obtenidos son los siguientes (Tabla 1.5):

Tabla 1.5: Datos reportados por dicho estudio (Recopilados por Lesser, 2006)

Transmisividad	$0.31 \text{ y } 0.17 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg}$
Coefficiente de almacenamiento	0.0022
Recarga vertical	$10 \text{ hm}^3/\text{año}$
Extracción de agua subterránea	$12.5 \text{ hm}^3/\text{año}$

“Estudio geohidrológico para la perforación de nuevos pozos para la extracción de agua potable para el abastecimiento del desarrollo turístico Golden Beach, en Loreto, B.C.S.”, elaborado por Basin S.A. de S.V. para Fonatur en el año 2003. El estudio menciona que la Formación Comondú está conformada por rocas volcano-sedimentarias y sedimentarias de muy baja

permeabilidad, sin embargo el miembro superior de esta Formación está constituido por andesitas y basaltos fracturados, y le asigna una permeabilidad de baja a media. Además, menciona fallamiento normal que se manifiesta a lo largo de la Formación Comondú, en el cual el bloque caído conforma estructuralmente al y la zona costera. Concluye que para la zona de Loreto, las captaciones deben buscarse en la cuenca de Loreto, aguas arriba de las captaciones actuales.

“Opinión Técnica sobre el proyecto de desarrollo turístico de Fonatur en la región de Loreto, BCS”, elaborado por la gerencia de Aguas subterráneas del Consejo Nacional Agropecuario (CNA) en el año 2005. En el estudio se resumieron las condiciones hidrogeológicas técnicas y administrativas de la región Loreto. Para el Acuífero de Loreto, con una extensión de 300 km², la recarga es por infiltración de lluvia y de los escurrimientos en los flancos de la sierra, la cual se estima menor a 2 hm³/año. Así mismo, la recarga posiblemente se haya incrementado en el Acuífero de Loreto por la importación de agua desde el Acuífero de San Juan B. Londó. Además de mencionar que existe sobreexplotación con una intrusión salina incipiente. Del Acuífero de San Juan B. Londó menciona que está principalmente constituido por depósitos aluviales con permeabilidad media y está limitado a profundidad por la Formación Comondú. Este trabajo reportó datos importantes del acuífero descritos en la Tabla (1.6).

Tabla 1.6: Datos extraídos del estudio, (Recopilados de Lesser, 2006)

Recarga	6 hm ³ /año
Extracción	7 hm ³ /año
Abatimiento	(De 1986 a 2005) de 5 a 10 metros
Volumen concesionado REPDA	7.7 hm ³ /año

“Datos Piezométricos en pozos del Acuífero de San Juan B. Londó”, obtenidos de la Gerencia Estatal en Baja California Sur de la CNA en el año 2005. Se realizó un censo de aprovechamientos subterráneos considerando 27 pozos en el Valle de San Juan B. Londó y se realizó la configuración de la profundidad y elevación del nivel estático.

“Futuros Alternativos para la región de Loreto, Baja California Sur, México”, elaborado por la Universidad de Harvard, la Universidad Autónoma de Baja California Sur, la Universidad de Arizona, el Centro de Investigaciones del Noroeste, Environmental Systems Research Institute (ESRI), la Universidad Estatal de San Diego y el Instituto Oceanográfico de la Universidad de California en San Diego, en cooperación con el Municipio de Loreto, BCS, en el año 2005. Difiere con el estudio de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos y el Instituto de Geofísica⁷ en cuanto a la recarga anual. Este estudio calcula una recarga máxima de 2 hm³/año, producto de las precipitaciones por tormenta de

⁷Instituto de Geofísica. 1986. Estudio Geohidrológico-Geofísico en la cuenca de San Juan Bautista Londó, Municipio Comondú, Reporte para SARH, México: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, México.

cada dos años. Mientras que SARH y IGF estima una recarga de $10 \text{ hm}^3/\text{año}$. También estima que con las condiciones poblacionales y la recarga, para el año 2025, el tendrá intrusión salina. Además, sugieren localizar una fuente alternativa de agua para sostener el crecimiento, por ejemplo, con técnica de desalación.

Tabla 1.7: Datos reportados por dicho estudio (Recopilados por Lesser, 2006)

Recarga	$2 \text{ hm}^3/\text{año}$
Límite para la extracción sostenida	$0.9 \text{ hm}^3/\text{año}$

“Actualización geohidrológica en los acuíferos de San Juan B. Londó y Loreto, en el estado de Baja California Sur”, elaborado por Lesser y Asociados S.A. de C.V. en 2006. En este trabajo se censaron 137 aprovechamientos, 70 de los cuales se encuentran en el Acuífero de San Juan B. Londó (37 son pozos, 28 norias y 5 manantiales). De los 70 aprovechamientos, 16 son utilizados para riego, 4 de uso potable (agua que es conducida a Loreto), 12 en abrevadero y 38 restantes no tienen uso o no se obtuvo información. Añade que los 4 pozos de abastecimiento de agua que conducen a Loreto ocasionan una depresión piezométrica en la porción sur del . También menciona que la recarga principal para el acuífero granular proviene del norte y sur del valle. Reporta que el abatimiento del nivel piezométrico ha provocado un gradiente hidráulico invertido en el estrechamiento topográfico que une al Valle de San Juan B. Londó con la desembocadura al mar. Esto significa que no existe salida de flujo subterráneo del valle a la desembocadura al mar. Reportan que la zona de la desembocadura de San Bruno no tiene conexión con el Valle de San Juan B. Londó y que esta zona sí tiene intrusión salina. Agregan que el acuífero fracturado de la Formación Comondú tiene buen rendimiento y representa la principal fuente de abastecimiento de la región Loreto con caudales entre 11 y 22 lps. Se realizó un estudio geoquímico del agua en el Valle de SJBL y en la línea de costa de Loreto. De dicho estudio determinaron 4 familias de agua, de acuerdo a su composición a lo largo del valle: al norte clasificaron al agua como sódico clorurada, evidenciando la presencia de sales evaporíticas de origen marino. Al centro del valle el agua fue clasificada como sódico-bicarbonatada, correspondiente a agua de reciente infiltración. Al extremo suroeste predomina el agua mixta-bicarbonatada, asociada a agua de lluvia. Finalmente, hacia la desembocadura de San Bruno, el agua es de tipo sódico-clorurada, lo cual evidencia la influencia de materiales de fácil disolución (sales marinas, yesos o presencia de agua marina por intrusión marina). Concluyen que no existe disponibilidad de agua subterránea y que el Acuífero SJBL se encuentra sobreexplotado. Por otra parte, el Acuífero de Loreto tiene disponibilidad de $2.44 \text{ hm}^3/\text{año}$. El estudio registró los siguientes datos del Valle de SJBL (Tabla 1.8) y de San Bruno (Tabla 1.9).

Tabla 1.8: Datos del Valle de SJBL, tomados de Lesser (2006).

Extracción	6.12 hm ³ /año
Niveles Estáticos	30 m.s.n.m (al pie de la sierra), 25 m.s.n.m (sur del valle), 22 m.s.n.m. (norte del valle)
Abatimientos	0.5 a 1 m/año (2005-2006) al norte del valle.
Extracción	1.784 hm ³ /año (norte del valle), 0.438 hm ³ /año, 3.561 hm ³ /año, 6.12 hm ³ /año (Total).
Entrada por flujo subterráneo	4 hm ³ /año (SJBL)
Cambio de almacenamiento	-1.3 hm ³ /año (2005-2006), -0.8 hm ³ /año (1979-2006)
Infiltración vertical	0.8 hm ³ /año (2005-2006), 1.3 hm ³ /año (1979-2006)
Precipitación anual	200 mm ³ /año
Recarga total	4.8 hm ³ /año(2005-2006), 5.3 hm ³ /año (1979-2006)

Tabla 1.9: Datos de San Bruno, tomados de Lesser (2006).

Entrada por flujo subterráneo	1.1 hm ³ /año
Infiltración vertical	0.3 hm ³ /año
Extracción	0.2 hm ³ /año
Cambio de almacenamiento	0
Salida subterránea	1.2 hm ³ /año

“Estudio hidrogeológico de el Valle de San Juan Bautista Londó, B.C.S., a partir del análisis de datos electromagnéticos”, elaborado Arroyo (2018). Se realizaron 3 perfiles geoelectricos a aproximadamente 220 m de profundidad. Por medio de este estudio se interpretaron 4 unidades en el valle. La primera unidad es de una resistividad >30 Ohm-m con carácter hidrogeológico de tipo acuífero granular, y se asocia a depósitos poco consolidados (grava-arena y arena-limo). La segunda unidad está subdividida en dos partes: la más somera (4-25 Ohm-m) es de tipo acuitardo y acuífero granular. Son materiales semiconsolidados de permeabilidad variable asociada a depósitos continentales de arena-limo y aluvión con poco contenido de arcillas, que descansan discordantemente sobre alternancias de arenisca-limolita de origen marino. La segunda parte de la unidad 2 (<3 Ohm-m) es de carácter hidrogeológico de tipo acuífero. Son materiales semiconsolidados de baja permeabilidad de arena-limo, con mayor aporte de arcillas. La unidad 3 (<3 Ohm-m) es de carácter hidrogeológico de tipo acuífero en un medio fracturado. Se puede relacionar con material de tipo arena-gravas y también arcilloso, que actúa como una frontera hidráulica por su baja permeabilidad que se reportó en este estudio. Sin embargo, en el informe de 2015 de Conagua¹ difiere con el trabajo de Arroyo (2018), ya que dicha institución no reporta material de

¹Comisión Nacional del Agua. 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el

baja permeabilidad a la profundidad (200m) a la que este trabajo lo hace. En su lugar, reporta un espesor de 300 m para el acuífero libre del valle, por lo cual no sería posible una frontera hidráulica a 200 m de profundidad. Además, tomando en cuenta que los materiales de la cuenca Loreto se depositaron durante una tectónica activa, debe presentarse permeabilidad secundaria por fracturas en dicha unidad. De aquí se concluye que la unidad 3 es material consolidado, fracturado y fallado. Finalmente, la unidad 4 (>5 Ohm m), la cual presenta un resistividad ligeramente mayor a la que le sobreyace, consiste en depósitos miocénicos que coronan al grupo Comondú. En la Tabla 1.10 se muestran las unidades reportadas por Arroyo (2018).

Tabla 1.10: Registro y descripción de las unidades reportadas por Arroyo (2018).

Unidad geoelectrica	Intervalo de resistividad [Ohm m]	Posible asociación hidrogeológica	Posible asociación litológica	
U 1	>30	Dependiendo de su ubicación espacial, de zona vadosa a saturada (acuífero granular).	Depósitos poco consolidados integrados por grava-arena y arena-limo.	
U 2	U 2a	4 a 25	Dependiendo de su ubicación, zona vadosa, zona parcialmente confinante (acuitardo) y zona saturada con agua ligeramente salobre (acuífero granular).	Materiales semiconsolidados de permeabilidad variable. La parte más superficial correspondería a depósitos continentales de arena-limo y aluvión con poco contenido de arcillas, los cuales descansan discordantemente sobre alternancias de areniscas-limolita de origen marino (posiblemente fracturadas y falladas), con intercalaciones de tobas del Complejo Volcánico Mencionares.
	U 2b	<3	Zona semiconfinante (acuicludo).	Materiales semiconsolidados de baja permeabilidad, compuestos de arena-limo, posiblemente con una mayor contribución de material arcilloso.
U 3	<3	Acuífero, zona saturada de agua con concentraciones medias de sales.	Material consolidado de relativa mayor permeabilidad (fracturado y fallado) compuesto de partículas de tamaño de arena-gravas, con poco contenido de arcillas.	
U 4	>5	Zona saturada con agua ligeramente salobre (acuífero en un medio fracturado).	Depósitos miocénicos que coronan al Grupo Comondú.	

1.5. Localización y vías de comunicación

El Valle de San Juan B. Londó se encuentra en el oriente de la Península de Baja California (Figura 1.2), concretamente en el Municipio de Loreto, Baja California

Sur. La zona de estudio queda aproximadamente entre las coordenadas UTM (Zona 12) entre 2892500 m a 2915000 m N y 435000 m a 465000 m O y queda comprendida en las cartas topográficas de INEGI G12-A78 y G12-A88.

La principal vía de acceso es por la carretera federal No.1, conocida como carretera Transpeninsular. Esta carretera cruza de norte a sur la Península de Baja California y conecta al valle y los poblados cercanos con la localidad de Loreto. Los aeropuertos con servicio nacional e internacional más cercanos a San Juan Bautista Londó son Loreto, la Paz y los Cabos. Los puertos de mayor importancia cercanos al la zona son Loreto y Santa Rosalía.

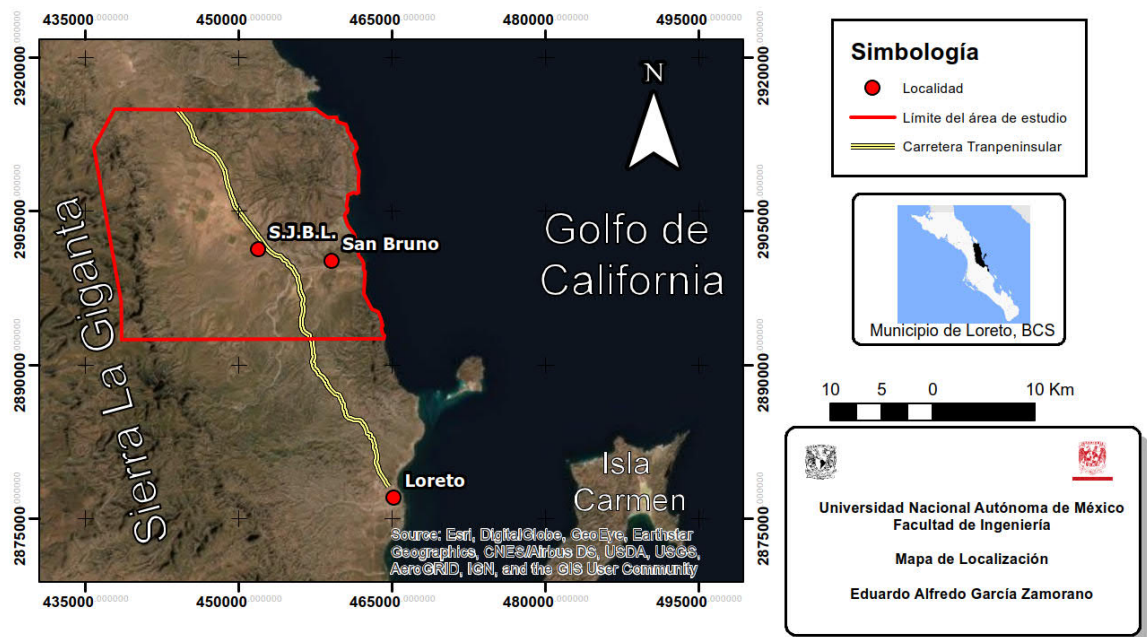


Figura 1.2: Mapa de Localización de la zona de estudio.

1.6. Geografía

1.6.1. Clima

El análisis del clima se realizó con base en las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN)² más cercanas a las zona de estudio y en un periodo del año 2001 al 2019 para la precipitación y del 2001 al 2017 para la

²Servicio Meteorológico Nacional. 2017. Reporte del clima en México. Reporte anual 2017, 13, 48 pp. Consultado en Mayo 2020. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2017.pdf>

temperatura y evaporación. Se encontraron 4 estaciones en la cercanía, además de una adicional en Loreto (Figura 1.3), la cual cuenta con los datos de precipitación más recientes, de 2018 y 2019.

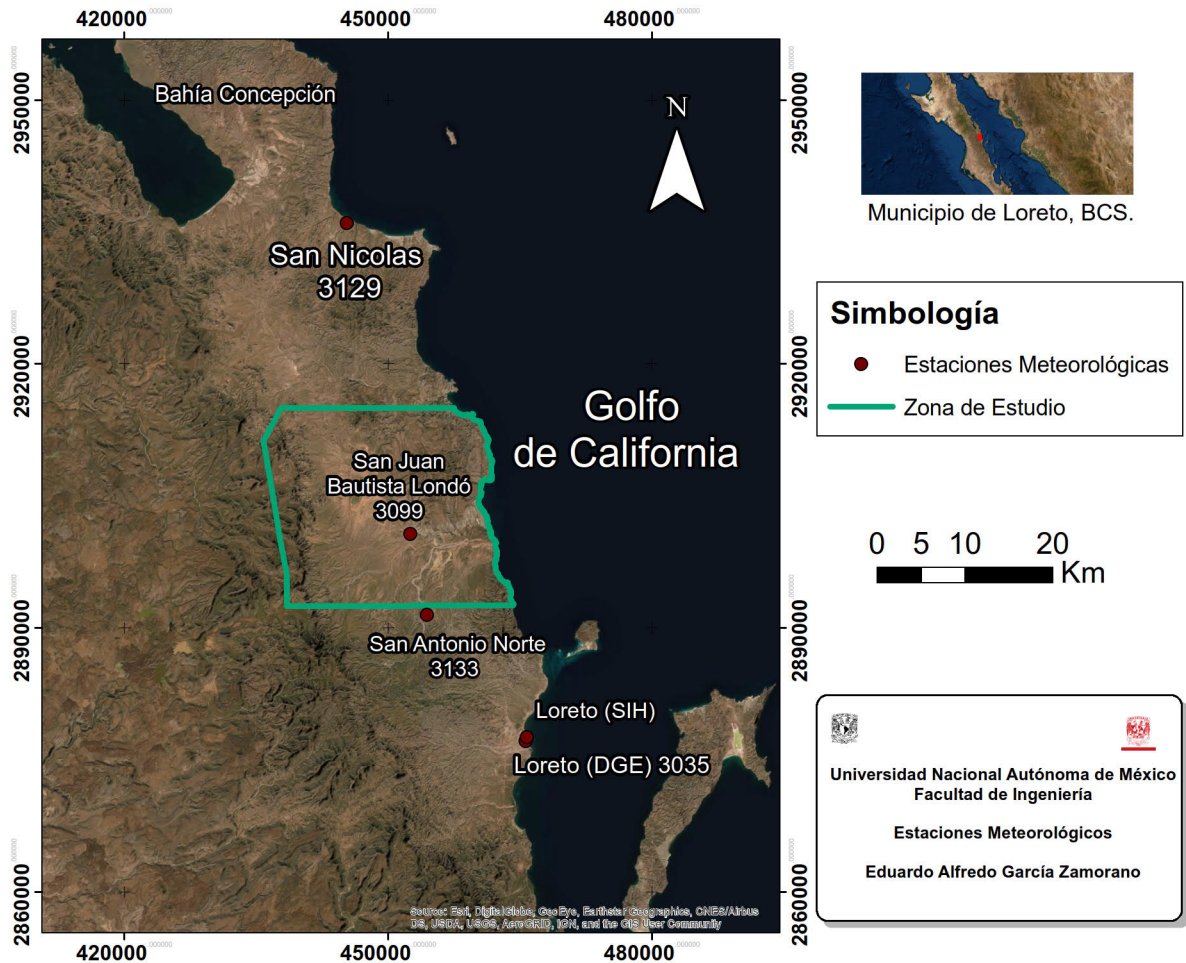


Figura 1.3: Localización de las estaciones meteorológicas para el análisis del clima en la zona de SJBL.

Precipitación

La lluvia es estrictamente estacional, son los meses de julio a octubre los de mayor precipitación y el periodo de menor precipitación está entre los meses de diciembre y febrero. De acuerdo con un análisis estadístico basado en las estaciones meteorológicas antes presentadas, la precipitación promedio anual en la región es de 219.7 mm y está influenciada por la temporada de huracanes (Tabla 1.11). El análisis se realizó con la información publicada por el SMN, en donde se promediaron los datos por año de las estaciones San Nicolás, SJBL, San Antonio Norte y Loreto (DGE), desde el 2001 al 2017. Además se tomó en cuenta otra estación

meteorológica en Loreto, la cual era la única estación de la zona que cuenta con información publicada de los años de 2018 y 2019.

Tabla 1.11: Media anual de preipitación de los años 2001 al 2019.

Año	Precipitación media anual [mm/año]	Año	Precipitación media anual [mm/año]
2001	166.1	2011	32.5
2002	50.9	2012	437.4
2003	315.2	2013	385.7
2004	178.3	2014	352.8
2005	80.7	2015	329.2
2006	324.3	2016	201
2007	129.7	2017	155.3
2008	330.5	2018	93.7
2009	210.3	2019	284.9
2010	115.8	Media	219.7

Temperatura

La región en general presenta un clima árido debido a la latitud en la que se encuentra la región, por el relieve y por las corrientes marinas. De acuerdo con los datos publicados por el SMN, la temperatura media anual de las estaciones meteorológicas consideradas en este estudio es de 23.9°C. En la estación de San Nicolás, hay una temperatura media anual de 24°C, en la estación de SJBL es de 23.6°C, en la estación de San Antonio Norte es de 22.9°C, finalmente en la estación de Loreto (DGE) es de 25°C.

Evaporación

La región tiene una evaporación media anual de 2018.3 mm/año. Dicho dato fue tomado de la estación meteorológica (Loreto DGE) en la ciudad de Loreto, ya que fue la única que presentó la información.

1.6.2. Fisiografía

La zona de estudio se localiza dentro de la Provincia fisiográfica de la Península de Baja California, en la Subprovincia de la Sierra la Giganta (Figura 1.4) (Bustamante-García, 1999). Esta subprovincia se extiende desde el sureste de la

Sierra de la Libertad (Baja California), hasta el suroeste de La Paz, Baja California Sur. Se caracteriza por presentar cadenas montañosas y valles tectónicos con orientación NO-SE, además forma parte de la cordillera Peninsular y su relieve forma sierras altas con mesetas basálticas. Los patrones de drenaje principales, son de tipo radial y dendrítico subparalelo. La red hidrográfica se constituye por corrientes intermitentes (Rodríguez-Díaz, 2009).



Figura 1.4: Provincias de BCS (Tomado de Comisión Estatal del Agua, 2015).

1.6.3. Geomorfología

El relieve del Valle de SJBL comprende diferentes formas, producto de una serie de procesos que han actuado en la zona desde el Pleistoceno, y varía en elevaciones desde 30 hasta 1000 msnm. Al centro de la zona de estudio (Figura 1.2) sobresale una llanura de inundación, la cual se extiende a lo largo de la zona con dirección N-S. Está constituida de material aluvial, proveniente de las partes altas, además tiene un patrón de drenaje de tipo paralelo. En ella se practica la agricultura, sostenida de agua subterránea, además de albergar numerosas comunidades. Al sur, en la llanura, se encuentran numerosos abanicos aluviales que evidencian los procesos erosivos de las zonas altas que limitan la planicie. Así mismo, se encuentran en la llanura diversas estructuras aisladas denominadas como macizos graníticos, los cuales afloran por procesos isostáticos. Al oeste, se encuentra un Piedemonte que se extiende a lo largo de las faldas de la sierra, el cual delimita a

la llanura por el occidente. El Piedemonte es producto de los procesos erosivos que suceden en la sierra, los cuales representan el principal aporte de sedimentos a la llanura y al Piedemonte. Dicha sierra es denominada como Sierra La Giganta, es el límite occidental de la zona de estudio y es el rasgo de mayor altitud. Comprende un patrón de drenaje de tipo dendrítico, el cual se amplía hasta el Piedemonte y se pierde en la llanura.

Al noreste se encuentran numerosos domos volcánicos agrupados en un complejo volcánico, denominado como Complejo Volcánico Mancenares. Limita a la llanura por el oriente y representa un alto topográfico significativo en la zona. Comprende un patrón de drenaje de tipo radial, del cual se extienden cañadas profundas. Al sur de este complejo se manifiesta una rampa calcárea con patrón de drenaje de tipo dendrítico. Al suroeste se encuentra una zona baja que representa la desembocadura al mar. Este rasgo está dividido de la llanura de inundación por un lomerío. Comprende una red paralela de drenaje y es el rasgo de menor altitud de la zona. En la desembocadura se manifiesta un lomerío calcáreo, el cual es modelado morfológicamente por agentes fluviales. De forma general, son los agentes endógenos los que predominante actúan en los procesos erosivos. En particular son las fallas geológicas las que modelan el actual relieve. Por otro lado, los agentes exógenos se expresan en una menor magnitud de entre los cuales están los agentes eólicos y fluviales, este último con menor presencia, debido a que el agua de la red de drenaje no circula de manera permanente durante todo el año.

Capítulo 2

Marco Geológico

2.1. Geología Regional

La geología regional de la Península de Baja California está constituida por rocas metamórficas, plutónicas, volcánicas y sedimentarias, las cuales comprenden edades del Paleozoico al Cuaternario. A grandes rasgos la geodinámica de la región estuvo controlada por procesos derivados de la subducción de la Placa Farallón por debajo de la Placa de Norteamérica, y del proceso de apertura del Golfo de California.

Las rocas más antiguas dentro de la zona de estudio son rocas intrusivas del basamento correspondiente con el Batolito Pensinsular, que varía su composición de granodiorita a granito y cuarzo monzonita con edades del Cretácico superior (McFall, 1968). Esta unidad está cubierta discordantemente por unidades recientes que representan un hiatus deposicional con edades del Paleoceno al Oligoceno, por lo que se puede pensar que el basamento afloraba en superficie durante esa época y fue fuertemente erosionado.

Durante el Oligoceno, se depositó una secuencia de carácter sedimentario continental, principalmente constituida de arenisca con estratificación cruzada, compacta, de textura fina a gruesa y con horizontes de conglomerado. Esta unidad corresponde con la Formación El Salto, asociada al Grupo Pre-Comondú (Durán-Calderón, 2016). El Grupo Pre-Comondú y Comondú consisten en rocas sedimentarias clásticas y vulcanosedimentarias producto de la erosión y erupciones tempranas del arco magmático continental que dio lugar a la Sierra Madre Occidental, las cuales sobreyacen al basamento de manera discordante. Así mismo, durante el Oligoceno tardío - Mioceno inferior se depositó una secuencia clástica continental de composición predominantemente silícea y que tuvo como fuente de aporte a la Sierra Madre Occidental (Umhoefer et al. 2001). Umhoefer et al. (2001) define a esta unidad como la Unidad Clástica inferior y la coloca dentro del Grupo Comondú. Sin embargo, Duran (2016) asocia a la Formación El Salto y a la unidad clástica inferior con el Grupo Pre-Comondú, dicha distinción se detalla en la Sección 2.3.2. En el Mioceno se depositó una unidad masiva

de vulcano-sedimentos, diques, domos y coladas de lava, la cual Umhoefer et al. (2001) denominó como la Unidad Media de Brechas y Flujos. Este último paquete de sedimentos está asociado con el Grupo Comondú.

Durante el Plioceno, rocas sedimentarias marinas, cubrieron gran parte de la costa sur oriental de la Península. Corresponden a facies distales hasta facies de línea de costa, están compuestas por alternancias de limolita, arenisca y horizontes de coquina y asociadas al material que rellena la Cuenca Loreto. Contemporáneo a estos depósitos marinos y prolongándose hasta el Pleistoceno inferior, se depositaron derrames piroclásticos y de basalto-andesita, y brechas basálticas.

Finalmente en el Pleistoceno inferior se depositaron derrames piroclásticos y de basalto-andesita, y brecha basáltica afanítica y compacta (pertenecientes al Complejo Volcánico Mencionados). Este pulso magmático es el registro volcánico más reciente de la región. Para el Pleistoceno superior se depositó material aluvial en forma de terrazas conformadas por conglomerados y areniscas como producto de la erosión más reciente. Los sedimentos aluviales fueron depositados durante el Holoceno. Están conformados por material que va en tamaño desde limo a arena, así como sedimentos de arroyo (Umhoefer et al. 2001). En la Figura 2.1 se puede observar una columna estratigráfica que representa de manera general la geología regional.

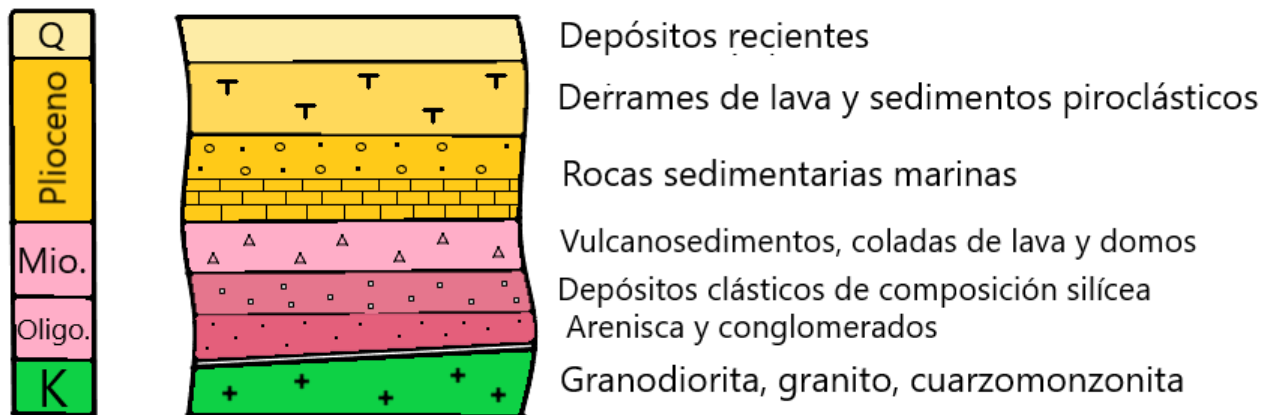


Figura 2.1: Columna estratigráfica regional.

2.2. Marco Tectónico Regional

El noroeste de México está dominado fuertemente por el volcanismo producto del hundimiento de la Placa Farallón-Guadalupe por debajo de la Placa norteamericana, a partir del Mesozoico medio hasta el Mioceno medio. Así como también

por eventos de deformación producto de la Orogenia Laramide, entre el Cretácico inferior y el Cretácico superior, de igual forma, por la apertura del golfo de California durante el Neógeno y Cuaternario. La influencia de estos eventos repercuten en la estructura y composición litológica del Valle de SJBL, de tal manera que es importante entender la evolución tectónica del noroeste de México, la cual ha sido estudiada a lo largo de décadas.

La tectónica del Paleozoico es la más antigua de la cual se tiene registro. Dicha tectónica corresponde, en gran medida, a un régimen de tipo margen pasivo en la región, además de diversos eventos de deformación. Teniendo como evidencia en el noroeste de México al cratón de Norteamérica, el cual abarcó parte de lo que hoy son los estados de Baja California y Sonora. Además de tres eventos de deformación, los cuales intervinieron en la tectónica de la región: 1. Orogenia Antler (Devónico-Carbonífero), 2. Orogenia Jaliscoana, 3. Sonoma (Pérmico-Triásico). En los últimos dos casos fue un arco intraoceánico el que colisionó contra la Placa Norteamericana (Dickinson, 1981). Fue hasta el Paleozoico tardío cuando el margen pasivo se convierte en un margen convergente, al momento en que la Placa Farallón converge con la Placa Norteamericana (Figura 2.2).

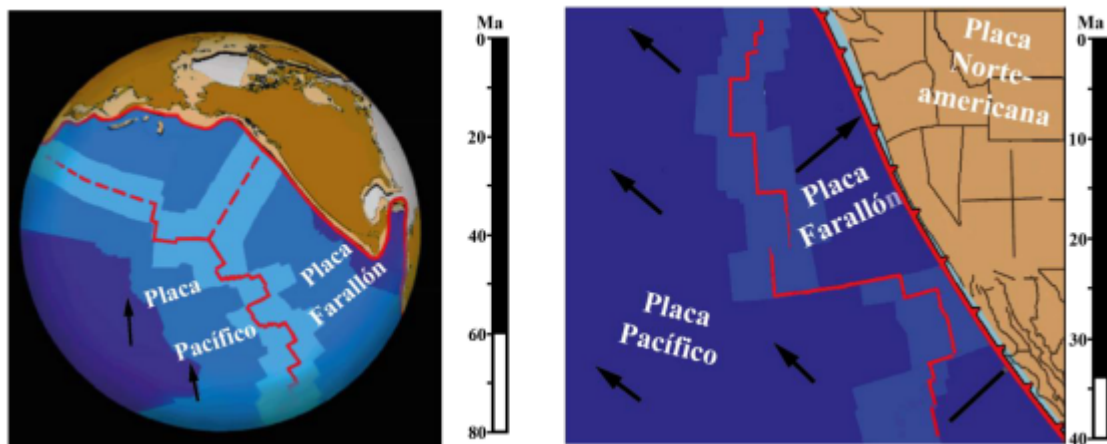


Figura 2.2: Evolución en la distribución de las Placas Farallón, Pacífico y de Norteamérica durante el Paleógeno (Paleoceno-Oligoceno). Se denota la subducción de la Placa Farallón por debajo de la Norteamericana. (Fragmento de imagen de Atwater, 2011).

Durante el Mesozoico el margen convergente presentó características de un sistema de arco asociados a grandes cuencas oceánicas (Busby, 2004). Es significativo que en casos así, la distancia de la dorsal (donde se forma nueva corteza oceánica) a la trinchera (donde subduce la corteza) varíe con el tiempo. Las propiedades físicas de la corteza al subducir variarán según sea el distanciamiento que la dorsal y la trinchera tengan. Cuando la distancia es grande, la corteza oceánica ha de ser vieja y fría (consecuentemente muy densa). Por el contrario, cuanto menor sea la distancia entre la dorsal y la trinchera, la corteza se comporta como una capa de roca caliente (consecuentemente menos densa). Ciertamente esto significa un

cambio en la velocidad y en el ángulo de subducción. Cuando una Placa subduce rápido y a un ángulo pronunciado es por que su densidad es mucho mayor, y así mismo de manera inversa, la Placa cuando subduce de manera más lenta y a un bajo ángulo es porque es menos densa.

En este periodo el margen convergente suscitó una evolución evidente en el ambiente tectónico estructural, ya que, entre 220-130 Ma la subducción era de alto ángulo, lo que produjo esfuerzos extensivos (Busby, 2004). Dicho esfuerzo puede ser explicado por el fenómeno de “rollback” o esfuerzo extensivo (Figura 2.3). Posteriormente, el ángulo de subducción disminuyó y ocasionó una fuerte interacción entre las Placas. Como resultado de esto último, surgió un régimen compresivo (Busby, 2004), el cual se intensificó hace 105-95 Ma (Engebretson et al., 1985). En resumen, la margen convergente entre la Placa Farallón y la Norteamericana evolucionó durante el Mesozoico, la cual pasó de un régimen de deformación extensivo a uno de deformación por compresión (Busby, 2004).

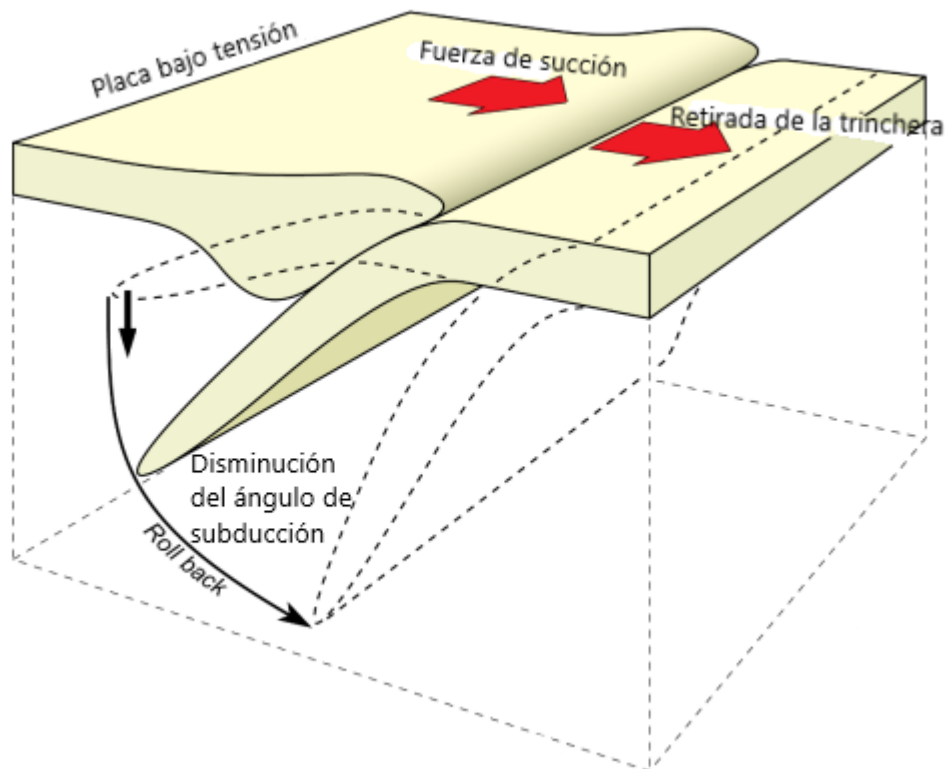


Figura 2.3: Esquema de “rollback”; la disminución de ángulo de una Placa en subducción.

Dicha evolución del margen convergente es una etapa importante y sumamente estudiada, ya que dio origen a la migración del arco magmático y al emplazamiento de la porción sur del Batolito de las Sierras Peninsulares (correspondiente al basamento en la zona de SJBL) en el estado de Baja California Sur y la porción

occidental de Sinaloa (Valencia-Moreno, 2011). Además, significó una deformación por compresión a nivel regional en dirección NE, típica de la Orogenia Laramide (Walawender et al., 1991). Se estima que hace 29 Ma el régimen tectónico pasó a ser transcurrente (Ferrari et al., 2013) y posteriormente el ángulo de subducción se incrementó, provocando no solo un retroceso del arco magmático (Todd et al. 1988), el cual se reubicó donde se localiza actualmente el golfo de California (Hausback, 1984), sino también un cambio a un régimen extensivo desde hace 23 Ma (Zanchi, 1994). La actividad de dicho arco volcánico originó la secuencia ignimbrítica calcoalcalina de la Formación Comondú. Poco después, la Dorsal Farallón-Pacífico colisionó con la trinchera, particularmente a lo largo de lo que ahora es la Península de Baja California, lo que ocasionó un cambio gradual de un margen convergente por un margen transtensivo. Es decir, la zona de la paleo-trinchera se convirtió en un sistema regional de fallas transformantes a lo largo de esa región, la cual conforma a lo que ahora se conoce como Falla Tosco-Abreojos (Figura 2.4A). Esto debido a que la Placa Farallón subducía de manera oblicua y al momento de la colisión, impactó de tal manera que formó una frontera de tipo transforme lateral derecha como nuevo margen (Bohannon et al., 1995). Así mismo, al momento de la colisión la Placa Farallón se fracturó, dividiéndose en fragmentos corticales más pequeños. Esta geometría dejó en cada extremo de la falla transformante puntos triples; al norte la Placa Mendocino (transforme-transforme-trinchera) y a sur la Rivera (dorsal-trinchera-transforme) (Atwater, 1970; Curray et al., 1984; Lonsdale, 1991; Bohannon et al., 1995).

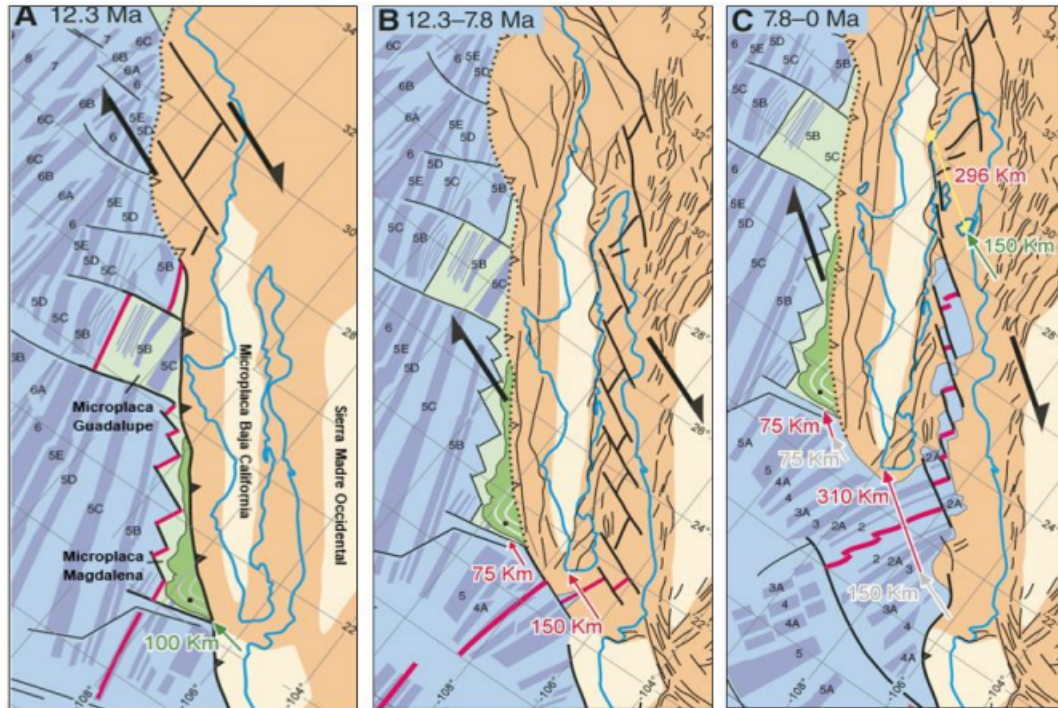


Figura 2.4: Evolución tectónica del margen occidental y oriental en la microPlaca de Baja California. A) Se muestra las Placas residuales de la Placa Farallón (producto de la subducción oblicua de la Placa Farallón) y el cambio de un margen convergente a un margen transformante (comenzando desde el norte, donde la Placa Farallón quedó completamente subducida) entre la Placa del Pacífico y la de Norteamérica. B) El margen a lo largo de la región de Baja California queda como un margen transformante y al este da comienzo un régimen extensivo. C) El margen transformante disminuye y se extiende el margen divergente al sur de la Península, formando el sistema de dorsales conectadas por fallas transformantes (Fletcher et al., 2007).

Hace 12.5 Ma la subducción de la Placa Farallón fue cesando gradualmente (Atwater et al., 1989; Lonsdale 1991; Ferrari, 2018). Existen diversos modelos de la evolución tectónica del golfo de California, sin embargo para este trabajo se consideró el propuesto por Fletcher et al. (2007). A los 12 ma de años, tras el fin de la subducción, comenzó un régimen extensivo-transtensivo (Figura 2.4B). En dicho régimen actuaron como mecanismos la Falla Tosco-Abreojos al oeste y al este el sistema de esfuerzos extensivos intracontinentales, producto de una posible ventana astenósfera como explica Fletcher et al. (2007) (Figura 2.5).

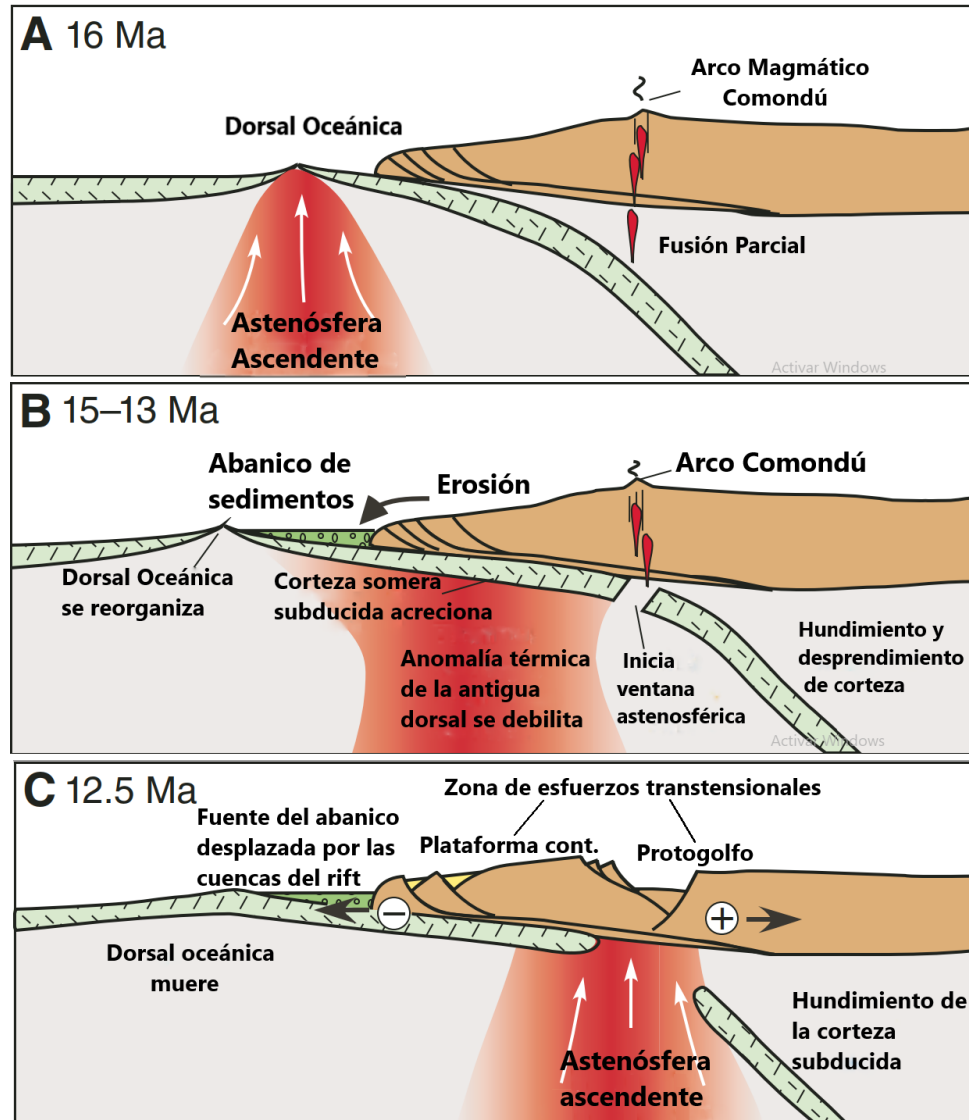


Figura 2.5: Sección esquemática tomada y modificada de Fletcher et al. 2007. Muestra en tres etapas la evolución del límite de Placas entre Norteamérica y pacífico y la Placa subducida Farallón. A) La dorsal del pacífico se aproxima a la trinchera, donde la Placa Farallón subduce. B) Se crea una ventana astenosférica por el rompimiento de la Placa subducida Farallón y la anomalía térmica acreciona con la parte inferior de la Placa norteamericana. C) La ventana astenosférica sirve como conducto para la porción de astenósfera que antiguamente ascendía por la dorsal. Se forma el proto golfo por la descompresión de la astenósfera.

Esto último, posiblemente debido a que cuando la corteza oceánica que subducía se separó por debajo de la Placa norteamericana provocó la apertura de una ventana astenosférica. Aunado a esto último, el acercamiento de la paleo-dorsal oceánica del Pacífico hacia la trinchera provocó una subducción de la anomalía térmica de la astenósfera perteneciente a la antigua dorsal Pacífico-Farallón. Como

resultado, un mecanismo extensivo producto del adelgazamiento de la corteza por el ascenso de la astenósfera a través de la ventana astenosférica (Fletcher et al., 2007). La Península de Baja California para entonces era una microPlaca limitada al oeste por la Placa del Pacífico y por la Falla Tosco-Abreojos y al este por la Placa Norteamericana dominado por un régimen extensivo (Stock et al., 1989).

Este último mecanismo perduró hasta los 5 Ma, cuando los esfuerzos extensivos del rift hicieron que se originara un sistema de dorsales conectados por fallas transformes (Mammerickx et al., 1982; Curray et al., 1984, Lonsdale, 1991) (Figura 2.4C). De los 5-3 Ma la Falla Tosco-Abreojos fue perdiendo importancia y finalmente, el sistema de dorsales se convirtió en la frontera entre la Placa del Pacífico y la de Norteamérica (Lonsdale, 1991). La presencia del margen divergente conectado por fallas transformes marca la evolución del Golfo de California. Posteriormente, el volcanismo a partir del Mioceno-Plioceno hasta el Cuaternario está asociado a los eventos de rifting (Hausback, 1984). El volcanismo Pliocénico tiene como principal característica su estilo eruptivo homogéneo y su distribución en franjas alineadas al NO, producto de la distensión. Dicha actividad volcánica de tipo alcalina corresponde con los domos y derrames del Complejo Volcánico Mencionares (Sawlan et al., 1984). El sistema de apertura continuó siendo el régimen predominante y el que definió la geología, aún hasta ahora. En el Plioceno ocurrió una gran subsidencia de tipo Pull-Apart que dejaron un gran aporte sedimentológico. Durante el Pleistoceno y el Cuaternario, se reporta una tasa alta de levantamiento, la cual produjo extensos abanicos aluviales (Mayer et al., 1999).

2.3. Estratigrafía

En la zona de estudio se presenta una geología que comprende rocas graníticas del basamento (Cretácico), rocas volcánicas y sedimentarias del Grupo Pre-Comondú y Comondú (Oligoceno-Mioceno), rocas sedimentarias marinas y rocas volcánicas (Pleistoceno) y finalmente depósitos de limos, arenas y gravas (Cuaternario), tal como se representa en el mapa del Valle de San Juan B. Londó (Figura 2.6) y en la columna estratigráfica (Figura 2.7).

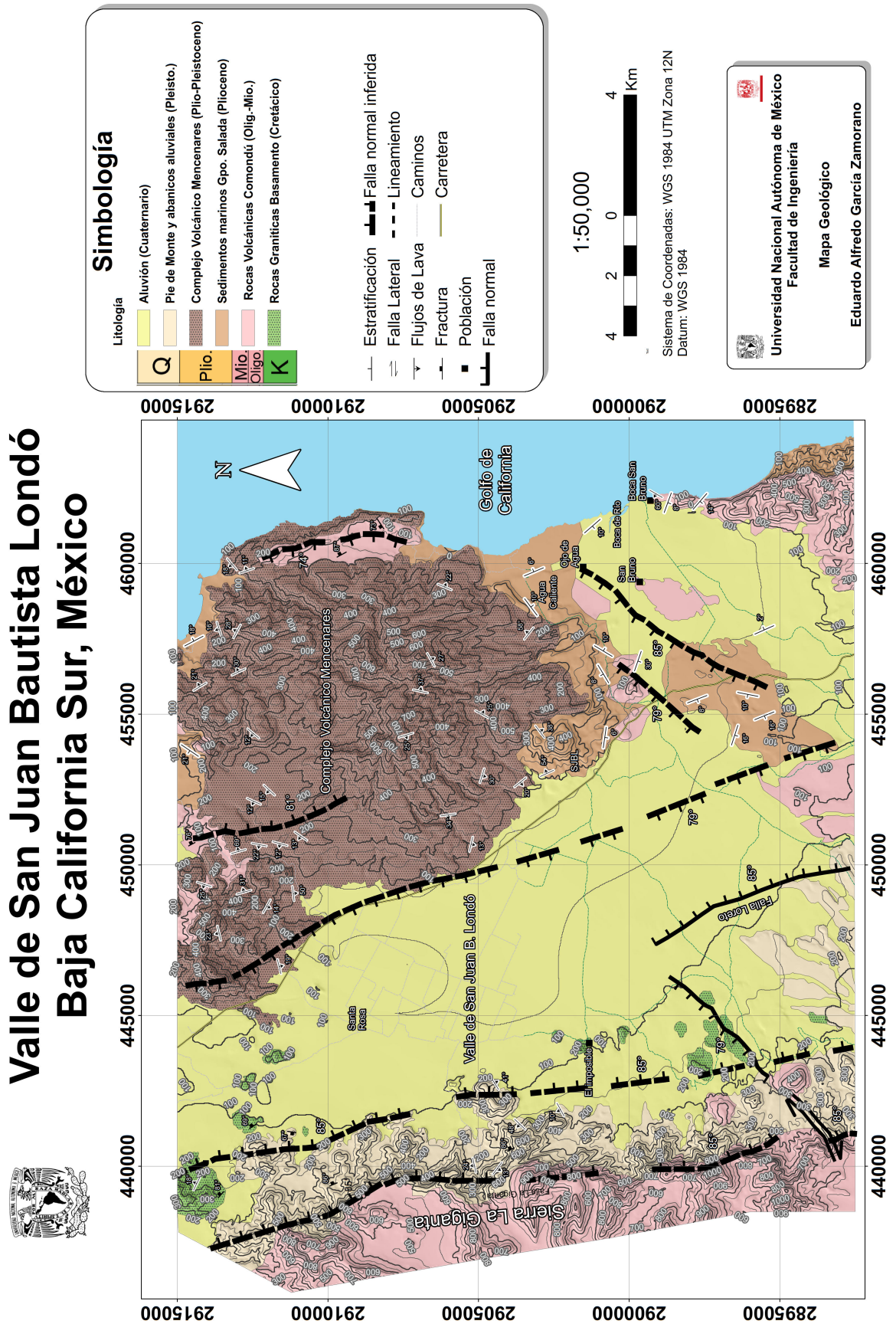
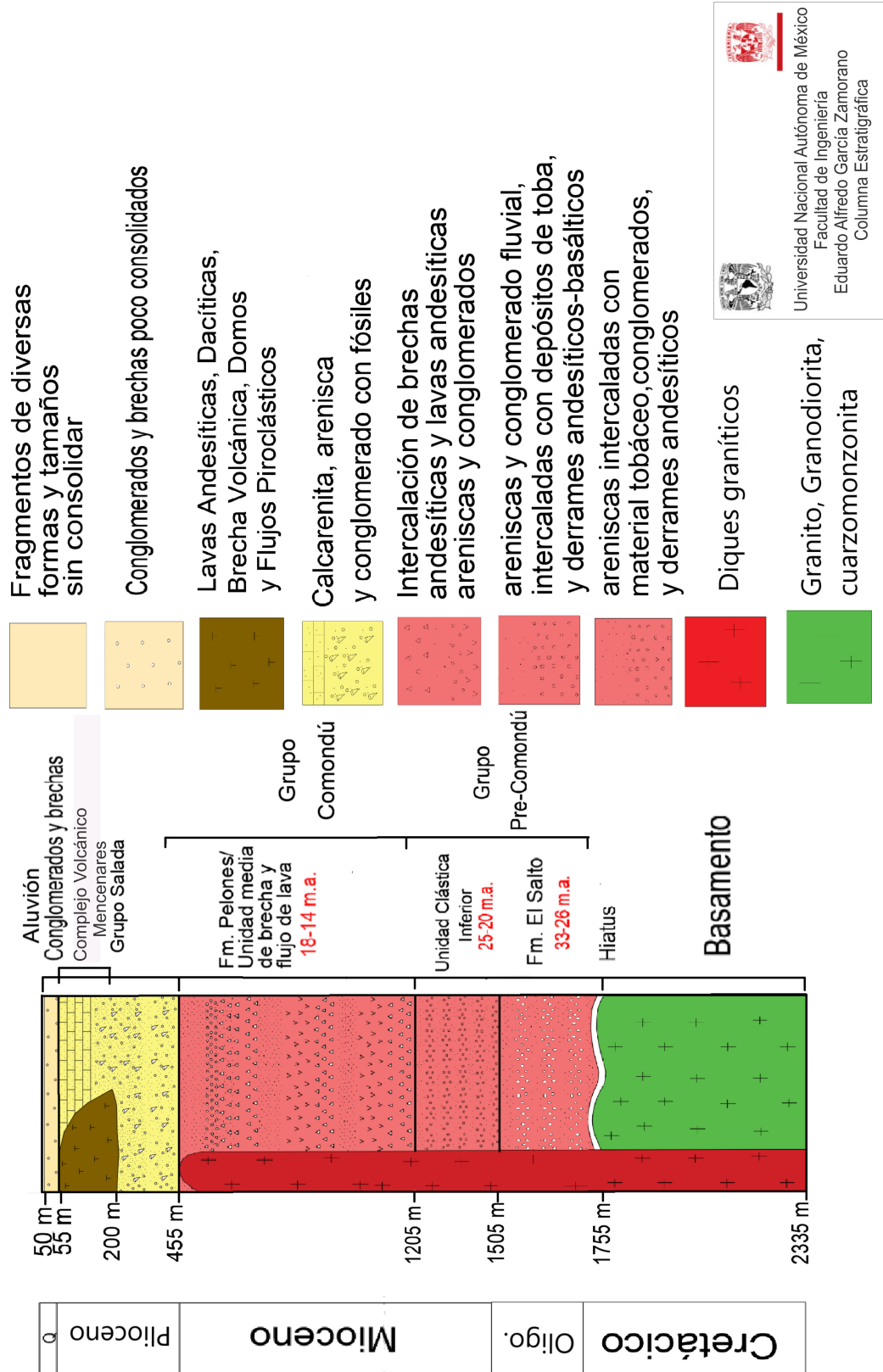


Figura 2.6: Mapa del Valle de San Juan B. Londó.



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería
Eduardo García Zamorano
Columna Estratigráfica

Figura 2.7: Columna estratigráfica.

2.3.1. Basamento

Conforma parte del cuerpo intrusivo denominado Batolito Californiano, el cual corresponde a rocas intrusivas de los siguientes tipos: gabros, granodioritas, dioritas y granitos (Gastil, 1979). En las cercanías del Valle de San Juan Bautista Londó se encuentran predominantemente granodioritas con hornblenda y biotita y pequeños afloramientos cuarzomonzoníticos con biotita (McLean, 1988). Las cuarzo monzonitas afloran al O del Valle de San B. Juan Londó, en donde se encuentran cortadas por lineamientos de fallas y fracturas. Por otro lado, la granodiorita puede ser observada en afloramientos cerca del rancho Los AguaJitos (McLean, 1988) y por la desembocadura de San Bruno (SARH-IGF, 1986), al NO de la ranchería El Salto (Rodríguez-Díaz, 2009). Ha sido fechada por McLean (1988) usando el método de K-Ar en una edad de 87.4 ± 2 Ma. Constituido por fenocristales de hornblenda, escasa biotita, está presente de manera intermitente, fuertemente alterada y discontinua en los afloramientos. Se encuentra cortada por diques aplíticos de espesores entre 5 y 10 cm (Rodríguez-Díaz, 2009).

2.3.2. Generalidades de los Grupos Pre-Comondú y Comondú

El Grupo Comondú y el Grupo Pre-Comondú han sido muy revisados por diferentes investigadores, consecuentemente esto ha implicado diferencias en su interpretación, ocasionando ambigüedades en la distinción de sus unidades. El Grupo Comondú fue descrito por primera vez por Heim (1922). Sin embargo, una de las revisiones más citadas es la de Umhoefer et al. (2001), quien clasificó al grupo Comondú en tres diferentes unidades: la unidad clástica inferior, la unidad media de brecha y flujo de lava y la unidad superior de flujo de lava y brecha. No obstante, Duran (2016) plantea el problema de que la unidad clástica inferior descrita por Umhoefer et al. (2001) tiene características similares a las unidades del Grupo Pre-Comondú, con dicha hipótesis postula que la unidad clástica inferior tendría que estar clasificada dentro del Grupo Pre-Comondú.

Duran (2016) sostiene dicha hipótesis con un análisis geoquímico y estratigráfico. En el cual concluye que la unidad clástica inferior tiene la composición de los clastos de la arenisca y un estilo eruptivo diferente a las demás unidades pertenecientes al Grupo Comondú. Así como también la cronología del emplazamiento no coincide, ya que estos depósitos coinciden con el segundo pulso de la Sierra Madre Occidental (Ferrari et al., 2005). Dicho pulso, de composición silíceo, está asociado al volcanismo producto de la extensión litosférica de la provincia de cuencas y sierras durante el Oligoceno (Ferrari et al., 2013), anteriormente asociado a un arco volcánico producto de la subducción. Por lo tanto, concluye que la unidad clástica inferior pertenece al Grupo Pre-Comondú. Para fines de este trabajo la clasificación del Grupo Pre-Comondú y Grupo Comondú quedarán como se describe a continuación.

2.3.3. Grupo Pre-Comondú

Formación El Salto

Se encuentra discordantemente por encima del basamento. Está conformada principalmente por una secuencia de areniscas, intercaladas con depósitos de toba, conglomerados y algunos derrames andesíticos-basálticos (Noble 1950; McFall, 1968; Maraver-Romero et al., 1997; Umhoefer et al. 2001). Rodríguez-Díaz (2009) observó la Formación en la ranchería El Salto en secuencia de areniscas ricas en cuarzo y litarenitas con estratificación cruzada y bioturbación, con intercalaciones de conglomerados y tobas. Fechada en 30-19 Ma y con un espesor promedio de 250-300 m (McFall, 1968; Noble 1950; Maraver-Romero et al., 1997; Umhoefer et al. 2001). Aflora al oeste y sur de Cerro Mancenares y al O y NO de Loreto.

Unidad clástica inferior

Descrita por Umhoefer et al. (2001), está constituida por una secuencia de areniscas fluviales y eólicas, con cuarzofeldespatos, de grano fino a medio con abundantes pellets y conglomerados intercalados con delgadas láminas de ceniza que en su conjunto presentan una coloración rojiza-ocre. El cristal más joven de los circones está fechado con edades de 24.8 ± 1 (Durán-Calderón, 2016). Sobreyace a las formaciones El Cien, San Gregorio y El Salto. Con esta última comparte similitudes en las facies, así como edades de máximo depósito (Godínez et al. 2010). El contacto superior es con la unidad media de brechas y flujos de lava, de tipo concordante y transicional (Umhoefer et al. 2001). Esta asociada temporalmente y composicionalmente con el pulso ignimbrítico del Mioceno inferior de la Sierra Madre Occidental, representa depósitos de facies distales (Umhoefer et al. 2001; Drake, 2005; Ferrari et al. 2013; Bryan et al. 2014).

2.3.4. Grupo Comodú

Unidad intermedia de brecha y flujo de lava

Ubicada al NO del Cerro Mancenares consiste en brechas masivas andesíticas, interestratificadas en menor cantidad con flujos andesíticos y en menor proporción de pórfidos andesíticos y basaltos. Gran parte de esta unidad aflora en un escarpe al O de Loreto, con edades aproximados a los 19 Ma (Umhoefer et al., 2001). Esta unidad podría corresponder a la Formación Pelones, propuesta por McFall (1968). Con espesores de 450-750m (McFall, 1968; Umhoefer et al., 2001). La Formación Pelones podría representar la Sierra la Giganta expuesta al O del Valle de San Juan B. Londó.

Unidad superior de flujo de lava y de brecha

La unidad superior propuesta por Umhoefer et al. (2001) coincide con la Formación Ricasón (Santa Lucía) descrita por McFall (1968) pero solo en Bahía Concepción, ya que esta unidad superior dentro del área de estudio toma similitudes con la Formación Pelones. Consiste en flujos de lava andesíticos y brecha masiva andesítica (de clastos proximales a la fuente), toba en poca proporción, con edades de 15-12 Ma y un espesor de 600 metros a los alrededores de Loreto (Umhoefer et al., 2001). Dentro del área de estudio, esta unidad está expuesta al E del Cerro Mancenares a lo largo de la Falla El Mangle, y al SO de Agua Caliente dentro del área de estudio, desde Boca San Bruno hacia el S hasta Punta San Bruno.

2.3.5. Formación Salada

Designada como Formación Salada por Beal (1948). Está constituida por sedimentos que rellenaron las cuencas estructurales que se formaron como resultado de las bahías al sur de Bahía Concepción. Se observan calcarenitas, areniscas fosilíferas y terrazas marinas (Casarrubias-Unzueta et al., 1994; Johnson et al., 2001; Umhoefer et al., 2001; Ledesma-Vázquez, 2002). Con edades de 3.3 ± 0.5 , 2.1 ± 0.4 , 1.9 ± 0.5 Ma en la toba acuática (McLean, 1987), lo que corresponde al Plioceno medio. Bigioggero (1996) divide esta unidad en dos secuencias: La inferior con depósitos de delta dominado por flujo de escombros, los cuales tienen una gradación lateral y hacia arriba a arenisca fosilífera marina y la superior constituida por una secuencia sedimentaria de transgresión marina compuesta por calizas bioclásticas y depósitos cercanos a la costa, cedidos por la limonita amarilla que rodea al Complejo Volcánico Mancenares. Rodríguez-Díaz (2009) describe a estos depósitos (al N del Cerro Mancenares) como areniscas fosilíferas de tonalidad ocre, coquinas, brechas de clastos andesíticos y conglomerados de moderadamente a mal clasificados. Se encuentra depositada discordantemente sobre las rocas miocénicas del Grupo Comondú. Al estar intercalada con flujos piroclásticos evidencia que la sedimentación marina fue contemporánea a los eventos volcánicos del Complejo Volcánico Mancenares durante el Pleistoceno temprano. Dentro del área de estudio se encuentran expuestos al SO y N del Cerro Mancenares, al O del Cerro Mancenares lo largo de la costa, y adentrándose a tierra firme siguiendo el Río San Juan. Compuesta por diferentes fósiles como bivalvos, restos de pectínicos y gasterópodos escasos que, se presume, corresponden al Plioceno superior (Rodríguez-Díaz, 2009). Cabe mencionar que Mina y Chávez-Valois en 1957 y 1978, respectivamente, utilizaron el nombre de Formación Salada para sus estudios. Por otro lado, Anderson et al. (1950) y Durham (1950) llamaron a estas mismas rocas las formaciones San Marcos, Carmen y Marquer (McLean, 1988).

2.3.6. Complejo Volcánico Mencenares

El Complejo Volcánico Mencenares comprende un área de 150 km², la cual alcanza una elevación máxima de 790 metros sobre el nivel del mar (msnm) correspondiente a la cima del Cerro Mencenares (Bigioggero et al., 1995). Representa el volcanismo calcoalcalino del Plioceno-Cuaternario, el cual estuvo regido por tectónica extensional. Bigioggero en 1995 y 1996 reporta que está constituido por tres eventos volcánicos:

- **1) Unidad San Juanico**

Constituida por domos riolíticos emplazados, junto con material piroclástico, los cuales incluyen flujos piroclásticos y depósitos de caída de ceniza. La lava que compone al domo es pobremente vesiculada y de una textura afanítica, contiene algunos fenocristales como plagioclasa, anfíboles, y en menor proporción biotita y clinopiroxeno. Estos fenocristales representan menos del 5% textural (Bigioggero et al., 1995).

- **2) Unidad Mencenares**

Consiste en volcanismo andesítico y dacítico que conforman capas delgadas de domos, brechas y depósitos piroclásticos arrojados por el estratovolcán Mencenares (Bigioggero et al., 1995). Con edades del Plioceno Superior (Casarrubias-Unzueta et al., 1994) y un espesor de 50 m, aunque en el flanco NO del Cerro Mencenares, presenta un espesor de 20-30 m (Bigioggero et al., 1995). Datada por Gillot, P.Y. (comunicación personal en Bigioggero et al., 1995) con una edad de 1.86 ± 0.1 Ma en una lava al sur de Cerro Mencenares. Esta unidad fue depositada en un ambiente aéreo, debido a la presencia de ceniza en la matriz y fragmentos líticos. Además la ausencia de material pómez sugiere que el origen de esta unidad fue por explosión hidromagmática (Bigioggero et al., 1995). En el flanco sur del cerro hay flujos de lavas datadas por P.Y. Gillot (comunicación personal en Bigioggero et al., 1995) en 1.86 ± 0.1 Ma. Es en ese mismo flanco del volcán que hay intercalación con biocalcarenitas de la parte superior de la Formación Salada (Bigioggero et al., 1995).

- **3) Unidad San Basilio-San Juan**

Esta unidad consiste en emplazamientos de domos de composición ácida a intermedia. Es la unidad más reciente del Complejo Volcánico Mencenares y se caracteriza por el lineamiento de sus domos con la tendencia de fallas N-S, pertenecientes al graben. Sobreyace en algunos casos a la unidad San Juanico y a la Formación Salada (Bigioggero et al., 1995).

2.3.7. Piedemonte y abanicos aluviales

Materiales granulares de tipo conglomerados y brechas poco consolidados empaquetados en arenas, relacionados al flanco de la Sierra La Giganta. Son producto de

la erosión de rocas ígneas en áreas con actividad tectónica. Se le estiman espesores superior a los 50 m. Los abanicos aluviales están ubicados en la parte suroccidental de la zona de estudio, la zona distal de los abanicos se encuentra depositados hacia el centro del valle¹.

2.3.8. Aluvión

Son los depósitos más recientes de la zona de estudio y están principalmente constituidos por gravas, arenas, arcillas que se encuentran distribuidos preferentemente en el lecho de los riachuelos y arroyos. Tienen un espesor variable y pueden alcanzar hasta los 100 m cerca de la costa en la zona de San Bruno².

2.4. Sistemas Estructurales

La zona de estudio presenta sistemas estructurales que son característicos en la Península de Baja California. Dichos sistemas denotan una morfología de tipo cuencas y sierras (Figura 2.8), cuya Formación está ligada con la apertura del Golfo de California. Las principales estructuras son fallas normales y fracturas con dirección NO-SE, NE-SO y N-S, cuya Formación ocurre durante regímenes extensivos y extensivos-transtensivos (SGM, 2016).

¹Comisión Federal de Electricidad. 1996. Estudio de resistividad y gravimetría en la zona, BCS, Santiago Papasquiari, DGO y Agua Caliente, BCS. Contrato CLS-GPG-3002/96.

²Comisión Nacional del Agua. 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el Acuífero San Juan B. Londó (0329), Estado de Baja California Sur. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos. México CDMX, 26 pp. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/102843/DR_0329.pdf.

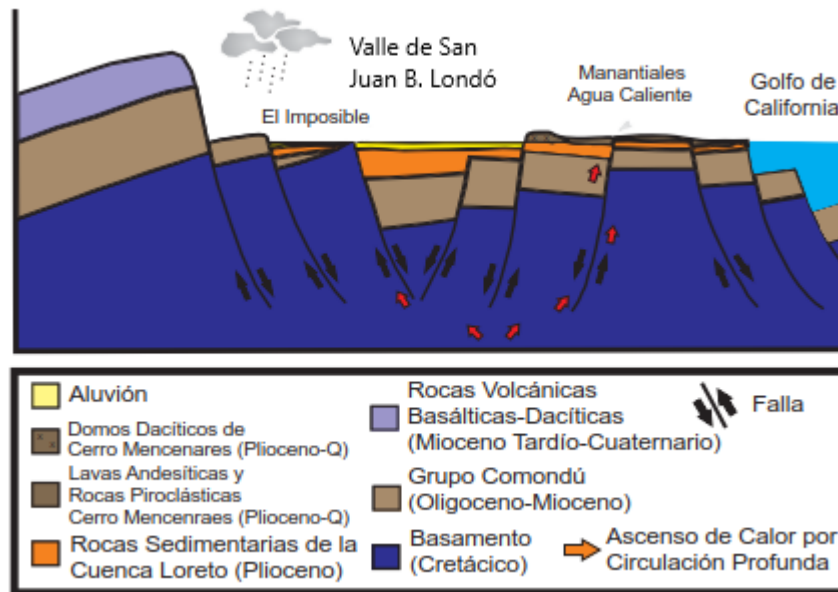


Figura 2.8: Representación del Graben tectónico de SJBL (Modificado por Rodríguez-Díaz (2009) de Casarrubias-Uzueta et al., 1994).

Bigioggero et al. (1996), definió al sistema con dirección NO-SE como el más antiguo, las cuales se asocian a un régimen extensivo ortogonal al momento de la apertura del proto-golfo de California. Se manifiestan como fallas normales que se demarcan a lo largo de la Sierra la Giganta. Las estructuras NE-SO, las cuales cortan y desplazan al sistema de fallas NO-SE, están representadas por fallas normales y están asociadas al régimen extensivo-transtensivo. Dicho régimen ocurrió al cese de la subducción y significó una tectónica denominada como de “Cuencas y Sierras” (Bigioggero et al., 1996). Finalmente el patrón estructural N-S está relacionado al régimen estructural de distensión y transtensión durante la fase final de la apertura del Golfo de California. Estas estructuras son fallas de tipo normal que desplazan a los antiguos sistemas y se denotan fuertemente en el Complejo Volcánico Mancenares, además la relajación térmica en el Complejo Volcánico Mancenares representó un factor para la manifestación de este sistema estructural (SGM, 2016).

Los principales sistemas estructurales de la zona indican un tipo de deformación de tipo frágil (SGM, 2016), el cual es característico de una morfología de tipo graben. El Graben o valle tectónico se delimita al oeste por La Sierra La Giganta, a lo largo de la cual se manifiestan dos fallas principales (una de ellas la Falla La Giganta) con dirección NO-SE y con gran desplazamiento que demarca el valle. Al sur del mapa (Figura 2.6) el Graben se hace más estrecho con la estructura de la Falla Loreto. Al este se ve limitado por una falla que al norte se manifiesta marcadamente pero al sur se debilita como un rasgo de lineamiento. Así mismo,

al este del valle resalta un alto topográfico constituido por los depósitos marinos. La Cuenca Loreto representa parte del graben con tendencia NO-SE a N-S.

En el Cerro Mancenares, las fallas tienden en una dirección N-S y NO-SE y tienen un echado característico de fallas normales. Fue por medio de las estructuras N-S que se cree que el material volcánico del Complejo Volcánico Mancenares se emplazó, y es por esto mismo que se contemplan dichas estructuras como de nula permeabilidad. Esta misma tendencia N-S, así como la reactivación de las fallas NO-SE, se pueden observar en las formaciones Comondú y El Salto (Zanchi, 1994).

Zanchi (1994), realizó un estudio para reconstruir la evolución de paleo esfuerzos durante el régimen extensional y transtensional, durante la apertura del Golfo de California. Dicho estudio, fue realizado en planos de fallas y otras estructuras de las formaciones Comondú y El Salto dentro de la Cuenca de Loreto. Se observó un lineamiento NO-SE (120° - 170°) con echados altos entre 80° y 90° . Dichos lineamientos corresponden a la tendencia regional asociado al escarpe del rift al momento de la apertura del Golfo de California y son asociados a regímenes de tensión o de fracturas por cizallamiento. Con respecto a los planos de estratificación, se muestran dos principales rumbos: NO-SE y N-S. Presentan echados de hasta 55° en bloques rotados por activación de fallas lítricas durante la apertura del protogolfo (Zanchi, 1994) y con direcciones hacia el NE y E (Zanchi, 1994). Casarrubias-Unzueta et al. (1994), identificaron un sistema de fallas normales E-O y echado hacia el S asociado a extensión.

Además, Zanchi (1994), identificó tres eventos de deformación en la evolución de la apertura del Golfo de California en las formaciones Comondú y El Salto (Figura 2.9). El primero fue el emplazamiento de diques, los cuales forman fallas y juntas concéntricas sub-circulares, dando como resultado un sistema radial. Dichas estructuras están asociadas a un régimen extensivo, las cuales fueron únicamente reconocidas en la Formación Comondú (Zanchi, 1994) y en el intrusivo granítico (Casarrubias-Unzueta et al., 1994). Esto último debido a que los flujos de lavas más jóvenes de 15 Ma cubrieron a dichos diques (Gastil, 1979). En algunos lugares los diques muestran una dirección NE-SO, los cuales representan poco desplazamiento y se encuentran sellado por cuarzo y calcita. Mientras que los lineamientos NO-SE representan apertura limitada pero con posibilidad para la movilidad de fluidos térmicos. El segundo evento fue el régimen extensivo, producto de la apertura del golfo representado por lineamientos y escalonamientos NO-SE con echados hacia el NE, ocurrido al finalizar el Mioceno medio (Zanchi, 1994; Casarrubias-Unzueta et al., 1994).

Finalmente, un evento transtensivo, en el cual las fallas normales con tendencia NO-SE, fueron reactivadas por fallas por desplazamiento y por movimientos oblicuos a la estriación original (Figura 2.9). Este sistema transtensivo afectó a toda la columna estratigráfica, desde el basamento hasta la Formación Salada. El sistema transtensivo además parece continuar activo dejando evidencia estructural en los depósitos de la cuenca y en depósitos volcánicos recientes (Casarrubias-Unzueta et al., 1994). Casarrubias-Unzueta et al. (1994) estiman que los conductos producto de dicho régimen sirven como conducto del fluido geotérmico teniendo relación

a profundidad con alguna fuente de calor. Cabe mencionar que los sistemas de fallas NO-SE presentan una rotación que lo reorienta en sentido N-S, atribuida a los procesos tectónicos que separaron a la Península de Baja California de la Placa de Norteamérica (Casarrubias-Unzueta et al., 1994).

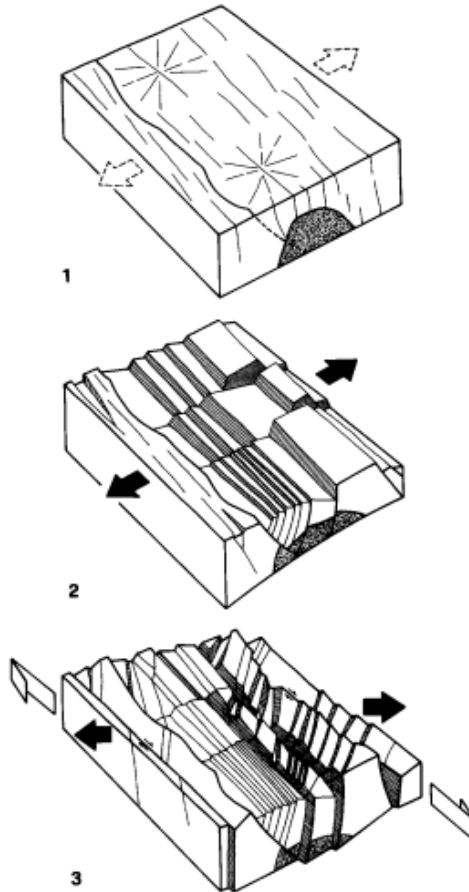


Figura 2.9: Ilustración extraída de Zanchi (1994), muestra los tres eventos de evolución de la apertura del proto golfo. 1) Sistema extensivo, tras el emplazamiento de diques. 2) Sistema extensivo y Formación de lineamientos NO-SE, tras la apertura del proto golfo californiano. 3) Régimen transtensivo, tras la reactivación del sistema de fallas formado durante la apertura del protogolfo (Zanchi, 1994).

En este estudio se desarrollaron 6 secciones E-O a lo largo del rift, como se muestra en la Figura 2.10. Cada una de las secciones se extrajo del modelo conceptual que se realizó en el software de Move y se editaron en un software de edición gráfica (Figura 2.11 a 2.16).

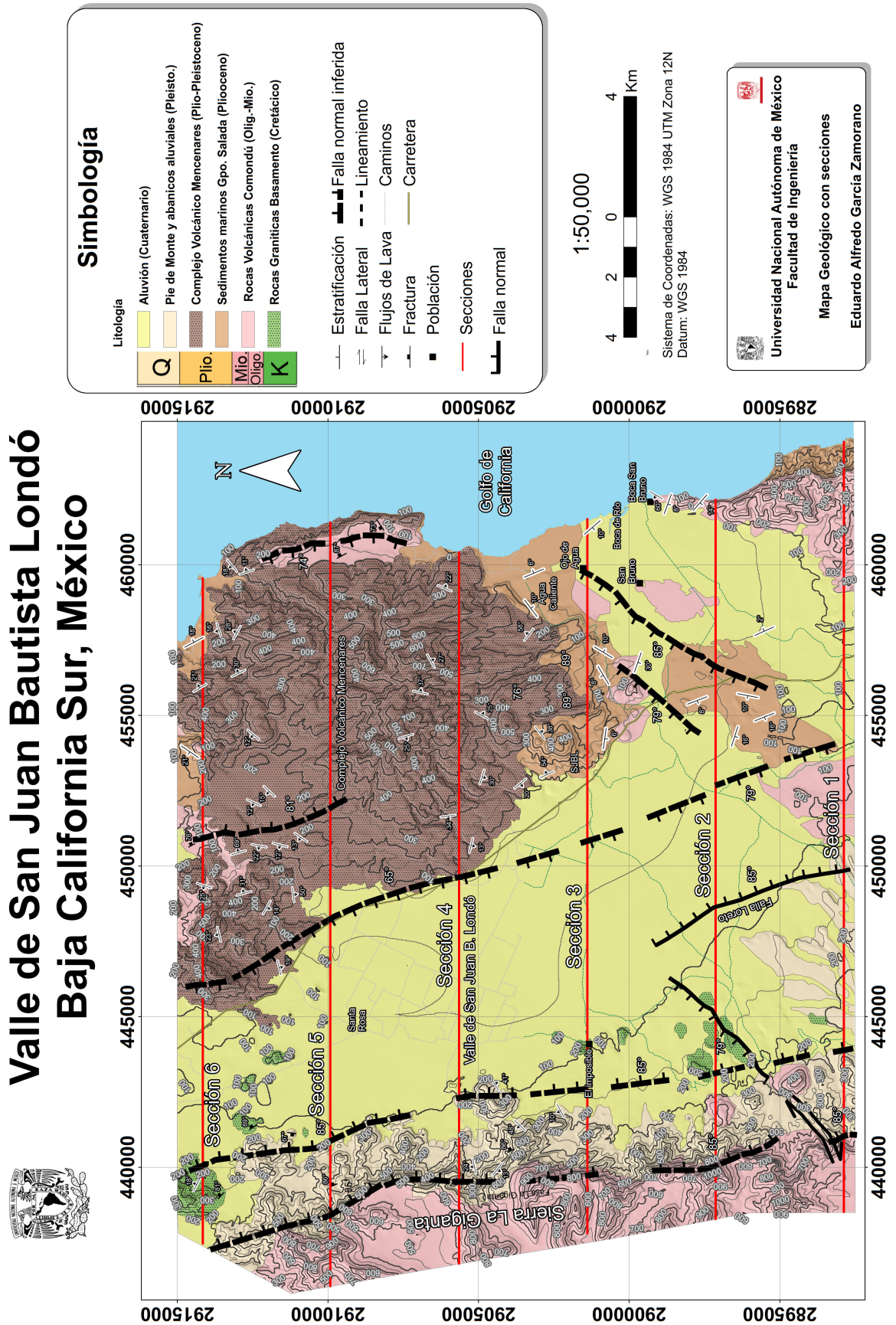


Figura 2.10: Mapa que muestra las secciones de la zona de estudio, Valle de SJBL, BCS.

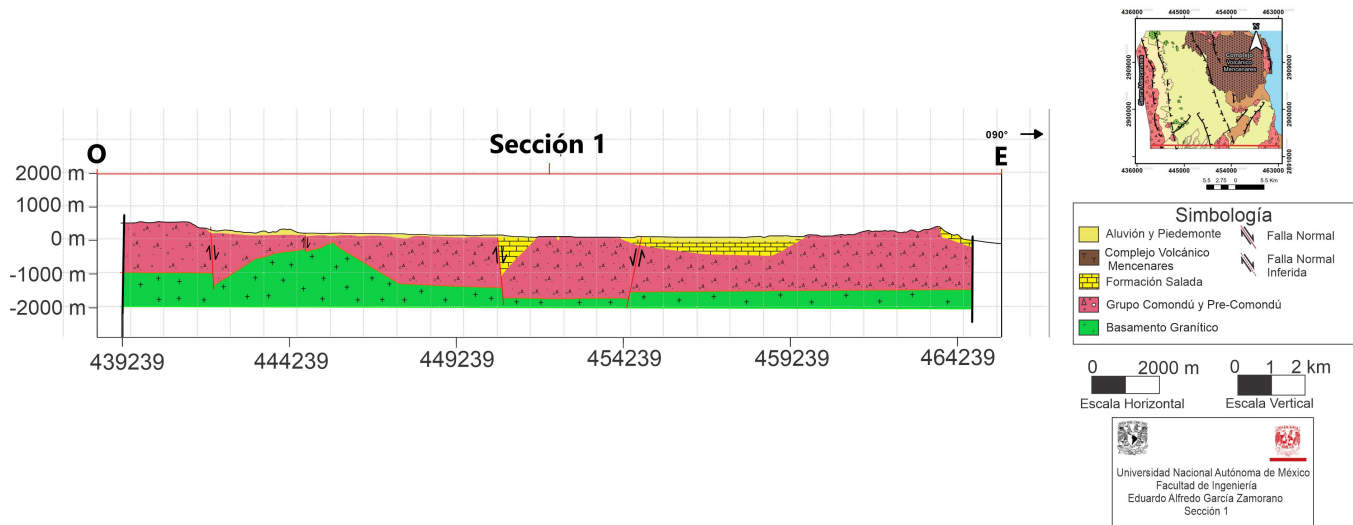


Figura 2.11: Sección 1.

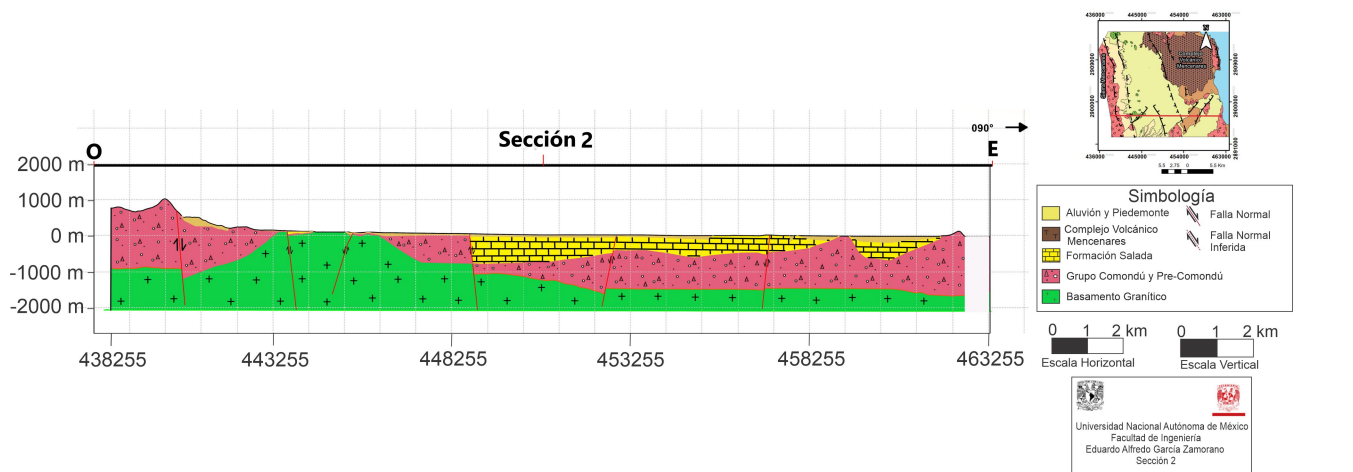


Figura 2.12: Sección 2.

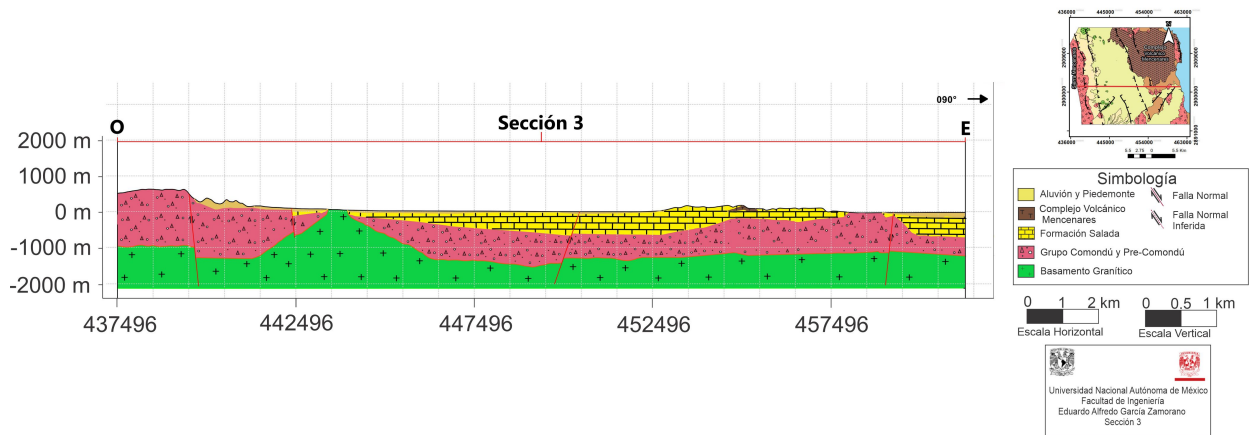


Figura 2.13: Sección 3.

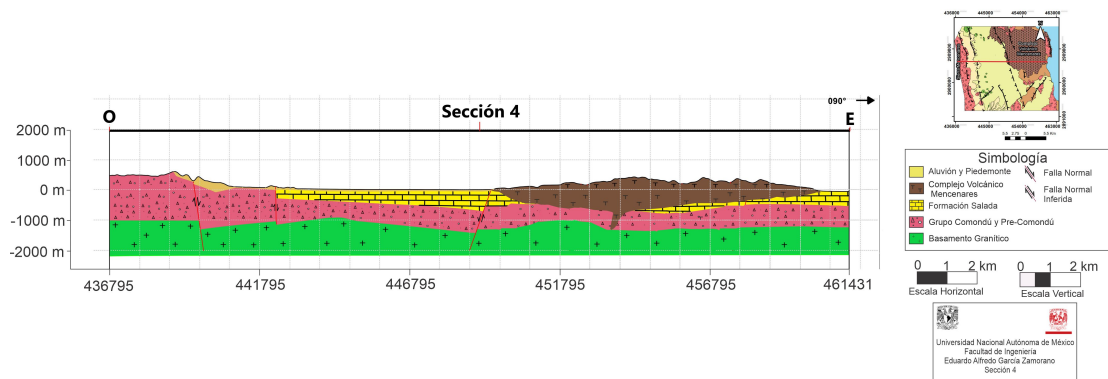


Figura 2.14: Sección 4.

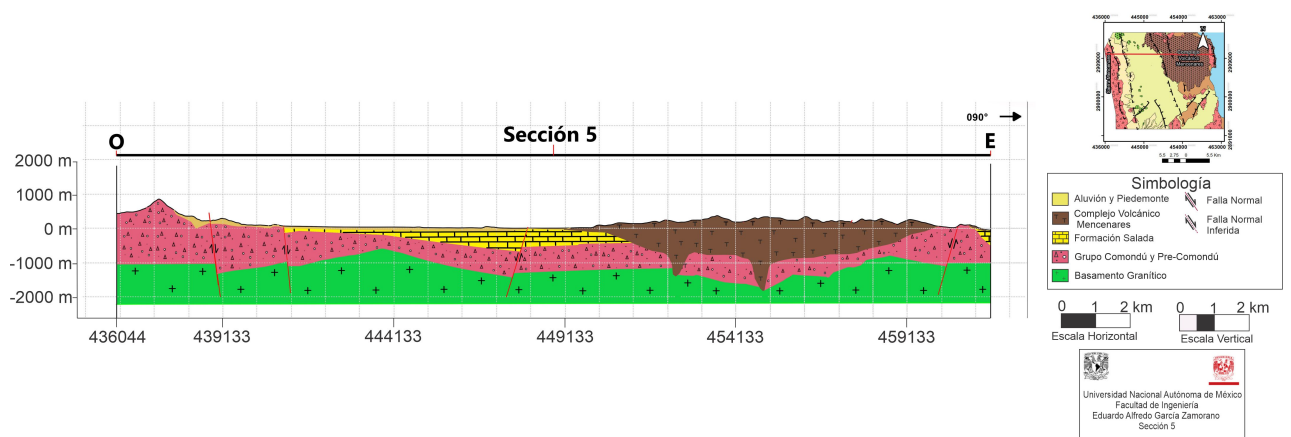


Figura 2.15: Sección 5.

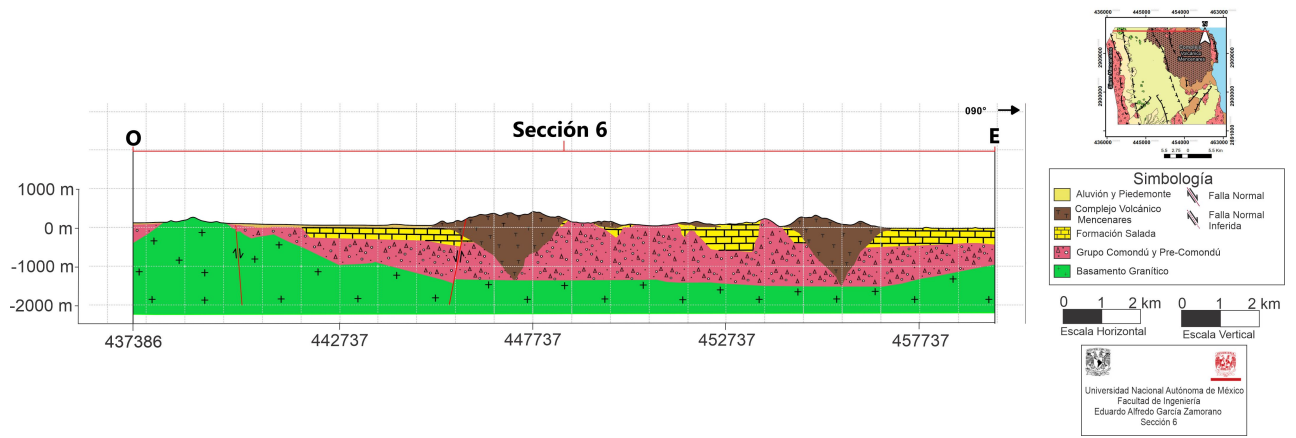


Figura 2.16: Sección 6.

Capítulo 3

Modelo conceptual del Acuífero de San Juan Bautista Londó

El Acuífero de San Juan Bautista Londó está comprendido en un valle tectónico, el cual está relleno por materiales granulares que constituyen el principal acuífero, que es de tipo libre, presenta permeabilidad media y tiene un nivel estático cercano a la superficie. El IGF UNAM¹, por medio de estudios geofísicos determinó un espesor máximo del acuífero de material granular de más de 300 m. La principal recarga proviene de los extremos norte y sur del valle por medio del flujo subterráneo. Además, existe otro flujo subterráneo asociado a fallas y fracturas de la Formación Comondú provenientes del flanco poniente del valle (Sierra La Giganta). Dicho flujo permite la posibilidad de un cuerpo acuífero a mayor profundidad y susceptible a ser una fuente de aprovechamiento.

El flanco noroeste corresponde con un complejo volcánico denominado Complejo Volcánico Mencenares. Dicha unidad está constituida por depósitos volcánicos que representan la actividad volcánica más reciente de la zona, por tal motivo, se cree que las fallas y fracturas de dicha unidad litológica están selladas, lo que impide el flujo subterráneo. Por otro lado, en la frontera oriental se encuentra la desembocadura de San Bruno, la cual comprende un área de 25 km². Esta se compone de materiales granulares de permeabilidad baja y media que permiten el almacenamiento de agua subterránea, sin embargo por causa de la excesiva extracción de agua esta área presenta intrusión salina, así como un parteaguas hidrogeológico entre la desembocadura de San Bruno y el valle (Lesser, 2006).

3.1. Dominio y geometría del sistema

El área de estudio se definió fuera de los límites del área hidrológica del Acuífero SJBL (al norte y poniente principalmente) con la intención de abarcar los pozos

¹Instituto de Geofísica. 1986. Estudio Geohidrológico-Geofísico en la cuenca de San Juan Bautista Londó, Municipio Comondú, Reporte para SARH, México: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, México.

y comunidades cercanas al acuífero que no habían sido considerados en el área trazada previamente por Lesser (2006), de tal modo que se incluye en el área de estudio una pequeña porción del área administrativa del Acuífero de Loreto, La Purísima y de Rosarito (Figura 3.1). Para fines de este trabajo se modelará la unidad hidroestratigráfica libre granular, la unidad confinada arcillosa, la unidad semiconfinada y la unidad fracturada correspondiente al Grupo Comondú del Valle de SJBL, las cuáles se describen a detalle en la Sección 3.5.

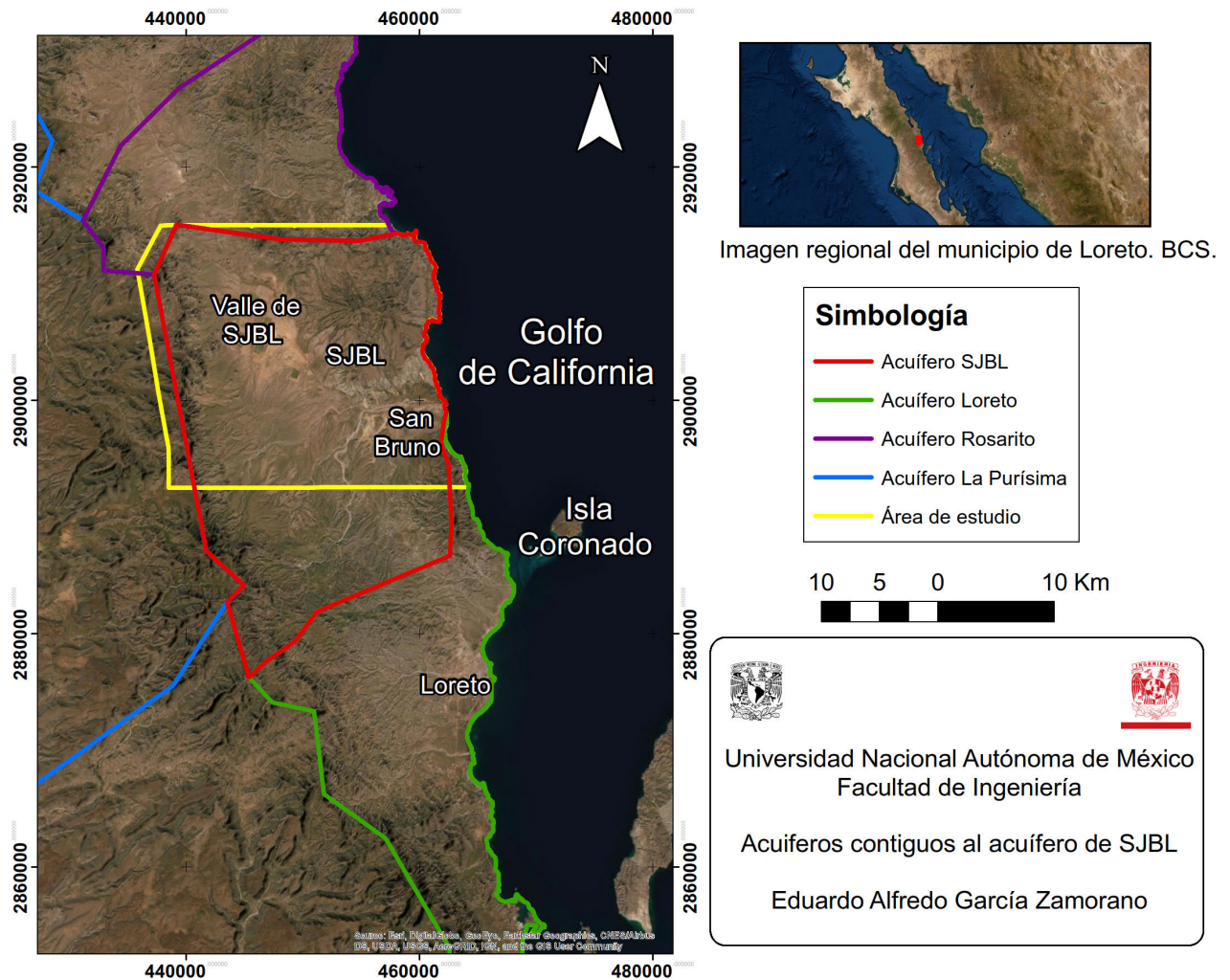


Figura 3.1: Área de estudio y acuíferos contiguos.

3.2. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera de un acuífero definen los límites hidráulicos del sistema hidrogeológico estudiado. Estas condiciones describen las entradas y salidas del flujo subterráneo, así como también las barreras impermeables (Figura 3.2).

Para este estudio las fronteras norte y sur están consideradas como entradas de flujo subterráneo, procedente de infiltración de agua meteórica sobre las sierras. En la frontera oriental se encuentra el Complejo Volcánico Mencionares y se comporta como una barrera al flujo. Esto último se explica debido a que las fallas del Cerro Mencionares fueron selladas por volcanismo reciente. Por otro lado, en la frontera poniente se encuentra la Sierra La Giganta, en la cual existe recarga de agua por medio de fracturas y fallas. Dicha recarga hídrica se incorpora al acuífero de mayor profundidad, comprendido en el Grupo Comondú y caracterizado por ser un medio fracturado. Al Sureste se encuentra el parteaguas hidráulico, el cual mantiene al Valle de SJBL separado de la desembocadura de San Bruno. La frontera sur es el Grupo Pre-Comondú, el cual está compuesta por areniscas intercaladas con material tobáceo y conglomerados de muy baja permeabilidad².

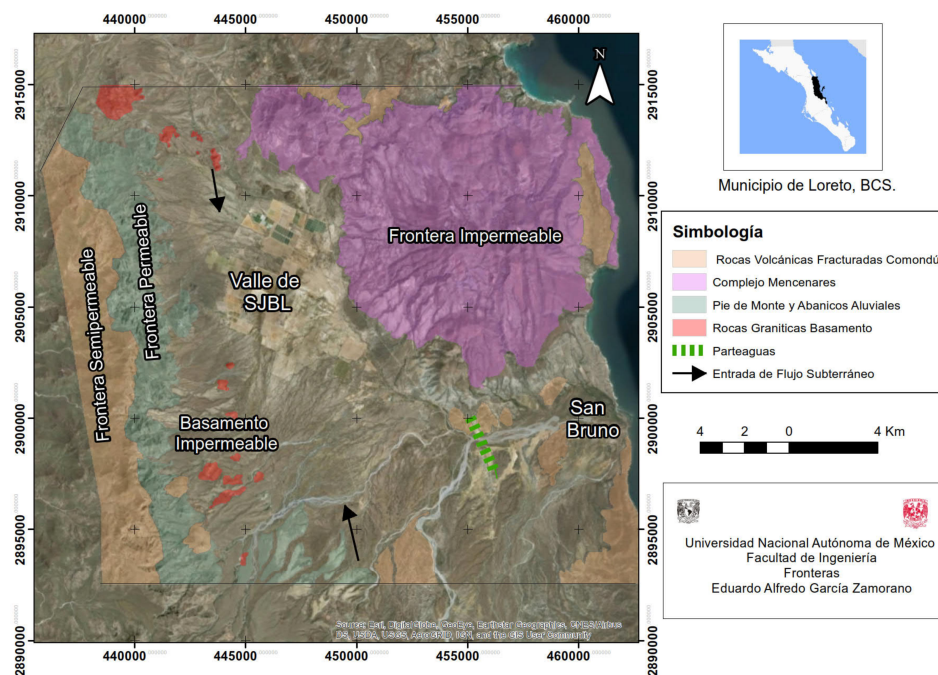


Figura 3.2: Condiciones de Frontera del Valle de SJBL.

3.3. Geoquímica

3.3.1. Calidad del agua subterránea

Los resultados que Lesser (2006) reporta de la medición de sólidos disueltos totales (STD) llevaron a la clasificación hidrogeoquímica del valle a 3 zonas: 1) Norte del

²Fondo Nacional de Fomento al Turismo. 2003. Estudio geohidrológico para la perforación de nuevos pozos para la extracción de agua potable para el abastecimiento del desarrollo turístico Golden Beach, en Loreto, B.C.S.

Valle de SJBL; 2) Sur del Valle de SJBL; 3) Desembocadura de San Bruno. En la zona norte del valle el agua presenta concentraciones medias de sales, entre 600 y 1500 mg/l. En la zona sur las concentraciones se reportan como bajas en contenido salino con poco más de 600 mg/l. Para la zona de la desembocadura de San Bruno se reportan valores de 1000 y 3000 mg/l, los más altos del valle. Por otro lado, las concentraciones que reporta el IGF UNAM³ fueron de entre 500 y 1700 mg/l en la parte centro norte del valle, indicando un aumento de la Sierra La Giganta hacia el valle. Para la parte sur del Valle SJBL se tienen valores menores a 700 mg/l. Además, en la zona de la desembocadura de San Bruno reporta valores de entre 1250 a 3000 mg/l.

3.3.2. Definición de los sistemas jerárquicos de flujo subterráneo

La teoría de sistemas de flujo propuesta por Tóth (1963) permite conocer la dinámica del agua subterránea por diferentes sistemas. Tóth (1963) propone una clasificación del flujo en sistemas: local, intermedio y regional. Se entiende por un sistema local, un flujo de reciente entrada al subsuelo que fluye únicamente a través de unidades hidroestratigráficas someras. Por otro lado, el sistema intermedio comprende el flujo subterráneo proveniente de medianas profundidades y de agua subterránea de mayor recorrido en el subsuelo. Finalmente, el sistema regional consiste en flujo subterráneo que recorre grandes distancias a mayores profundidades, inclusive puede viajar grandes distancias, incluso de una cuenca a otra.

El criterio para determinar el tipo de flujo se basa en el principio de gradiente geotérmico que dicta que la profundidad es proporcional a la temperatura (a mayor profundidad mayor temperatura). Así mismo, la concentración de iones es un indicador de un mayor recorrido en el subsuelo y prolongada interacción de agua roca, lo que permite al flujo adquirir más iones. Finalmente, las estructuras como fallas representan una vía permeable, por las cuales el agua de carácter regional se manifiesta a profundidades someras. A partir de un muestreo geoquímico de agua de pozos es posible determinar el sistema al que pertenece el flujo subterráneo en dicha área. A partir del muestreo que realizó el IGF en el 2015, se determinaron los distintos sistemas de flujo subterráneo en el Valle de SJBL. Se tomó en cuenta la temperatura, la concentración de iones mayores y la geología estructural para la clasificación de flujos subterráneos (Figura 3.3). Previamente, se realizó un balance iónico (Tabla 3.1) para verificar la fidelidad del análisis geoquímico. Se calculó el porcentaje de error del balance iónico para cada muestra, no sin antes hacer la conversión de mg/l a miliequivalente/l (meq/l). Si bien en hidrogeología se considera un buen análisis geoquímico, aquel en donde el error del balance no exceda el 10%. Del balance reportado en la Tabla 3.1 solo una proporción menor

³Instituto de Geofísica. 1986. Estudio Geohidrológico-Geofísico en la cuenca de San Juan Bautista Londó, Municipio Comondú, Reporte para SARH, México: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, México.

de las muestras superan el 10 %, las cuales se señalan con un asterisco en la Tabla 3.1.

Se evaluó la temperatura contra los iones mayores como se muestra en la Figura 3.4. Adicionalmente, se tomó en cuenta el sistema estructural propuesto en la (Sección 2.4) y expuesto en el mapa (Figura 3.3), para poder asignar un sistema de flujo subterráneo para cada muestra (Tabla 3.2). El análisis arroja que el sistema de flujo local corresponde con valores de temperaturas de entre 25-32 °C y concentraciones mayores entre 438.5 mg/l y 1582.9 mg/l. El sistema local-intermedio tiene valores de temperatura de 25-35 °C y concentraciones de iones mayores de entre 1725.4 y 3819.7 mg/l. El sistema de flujo intermedio tiene una temperatura entre 31.4-35 °C y concentraciones de entre 987.2-4129.9 mg/l. El sistema intermedio-regional representa valores de temperatura de entre 22.8-31.4 °C y concentraciones de iones mayores de 1324.5-33 715.6 mg/l. Finalmente, el sistema regional tiene valores de temperatura de entre 50.6-54.8 °C y concentraciones de entre 7095.87-8940.7 mg/l.

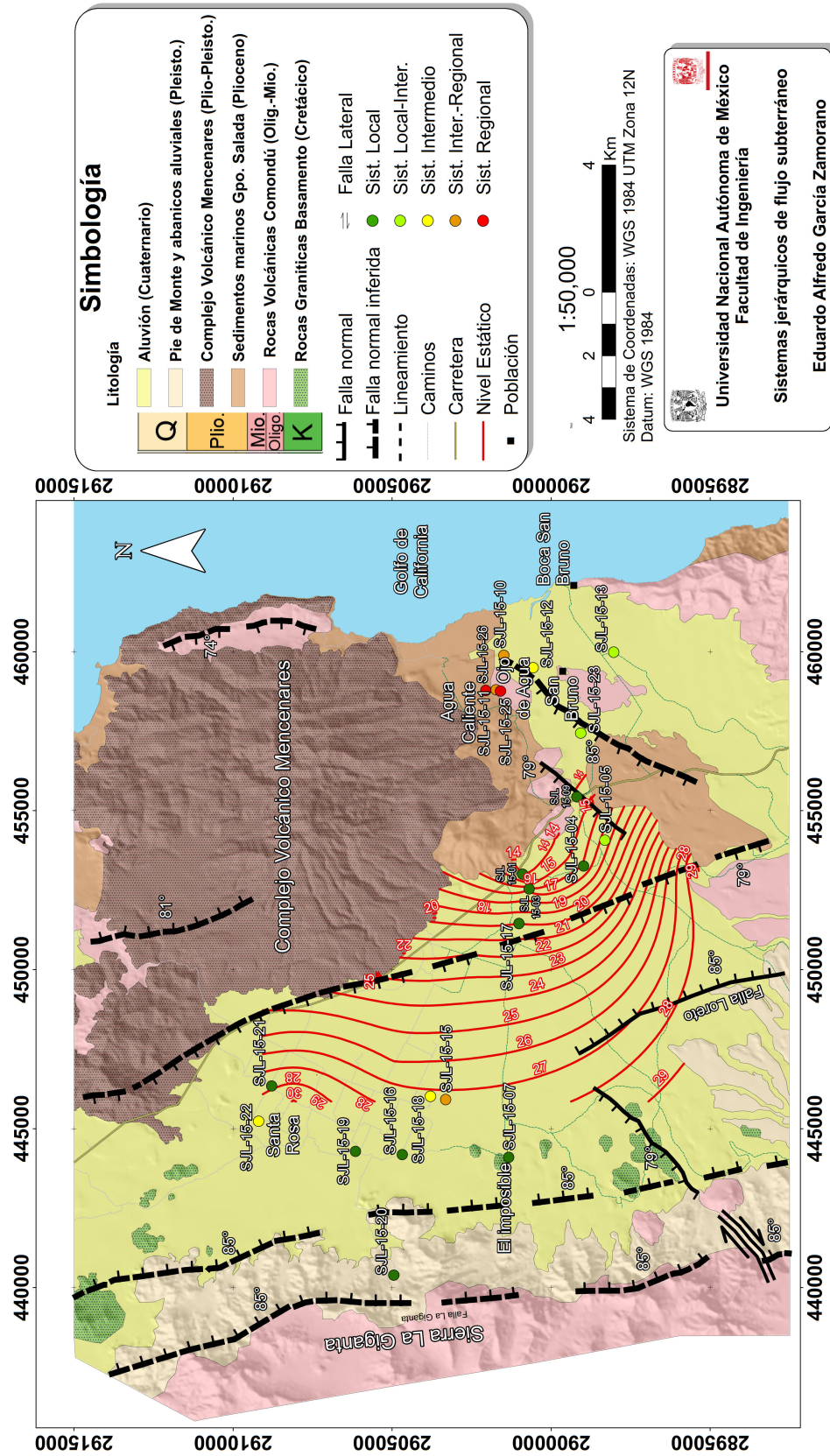


Figura 3.3: Sistemas jerárquicos de flujo subterráneo.

Tabla 3.1: Balance iónico de las muestras del IGF (2015).

Pozo	Longitud	Latitud	HCO ₃ ⁽¹⁻⁾ [meq/l]	Cl ⁽¹⁻⁾ [meq/l]	SO ₄ ⁽²⁻⁾ [meq/l]	Na ⁽⁺⁾ [meq/l]	K ⁽⁺⁾ [meq/l]	Ca ⁽²⁺⁾ [meq/l]	Mg ⁽²⁺⁾ [meq/l]	Sum. Cationes	Sum. Aniones	Error (%)
SJL-15-01	453011.96	2900900.5	2.951	11.268	12.708	9.043	0.294	5.4	5.383	20.120	26.927	-14.467
SJL-15-02*	452632.45	2900646.1	1.639	1.972	0.771	3.448	0.102	2.530	2.461	8.541	4.382	32.183
SJL-15-03	452544.7	2900686.3	2.131	3.380	0.958	3.674	0.026	1.460	2.272	7.431	6.470	6.916
SJL-15-04	453266.72	2898975.9	2.377	3.380	1.250	5.826	0.110	1.320	1.177	8.433	7.007	9.234
SJL-15-05	454080.57	2898310.7	4.672	5.070	34.167	28.391	0.178	5.7	4.016	38.286	43.909	-6.842
SJL-15-06*	453403.84	2895430.3	2.459	1.690	0.917	2.922	0.051	3.865	1.473	8.311	5.066	24.260
SJL-15-07	444103.74	2901332.4	3.115	6.197	1.208	6.522	0.138	3.13	1.909	11.700	10.520	5.307
SJL-15-08*	442489.7	2897758.9	3.689	3.380	0.229	6.043	0.043	3.1	1.663	10.850	7.298	19.570
SJL-15-09	455442.34	2899190.8	3.361	5.352	2.083	8.043	0.216	1.58	1.119	10.958	10.796	0.746
SJL-15-10	459892.03	2901487.6	1.557	594.366	13.75	400	10.205	110.5	4.247	524.952	609.674	-7.467
SJL-15-11	458809.07	2901728	2.459	135.211	2.75	80.435	1.872	30.25	0.560	113.117	140.420	-10.769
SJL-15-12	459501.59	2900563	1.885	73.239	2.792	41.217	0.783	12.95	3.564	58.514	77.916	-14.222
SJL-15-13	459987.24	2898034.2	3.525	47.887	16.25	33.870	0.147	10.85	10.123	54.990	67.662	-10.331
SJL-15-14	456505.89	2889824.4	2.705	3.380	4.792	4.435	0.103	3.26	4.041	11.839	10.877	4.234
SJL-15-15	445917.97	2903316	2.049	16.901	4.583	14.565	0.547	0.895	0.429	16.436	23.534	-17.757
SJL-15-16	444186.1	2904677.9	2.377	7.324	1.1875	5.609	0.030	2.985	2.387	11.010	10.888	0.556
SJL-15-17	451455.12	2901010.4	2.787	10.986	2.083	5.130	0.040	4.77	6.724	16.665	15.856	2.488
SJL-15-18	446019.85	2903796.3	1.967	27.606	6.875	27.957	0.673	3.58	2.033	34.242	36.448	-3.120
SJL-15-19	444290.29	2906146	3.361	5.352	1.375	6.696	0.014	2.615	1.605	10.930	10.088	4.006
SJL-15-20	440399.6	2904944	3.115	3.099	0.167	4.609	0.038	1.84	0.412	6.899	6.380	3.905
SJL-15-21	446346.16	2908784.3	3.361	14.366	2.625	9.783	0.085	3.375	3.465	16.708	20.352	-9.834
SJL-15-22	445235.81	2909195.5	2.869	11.268	2.125	8.913	0.041	3.345	3.021	15.320	16.261	-2.981
SJL-15-23	457446.96	2899072.2	2.869	16.901	5.833	27.783	0.263	0.61	0.733	29.389	25.604	6.884
SJL-15-25	458770.68	2901591.9	0.328	157.746	4.583	101.739	2.788	32.3	0.469	137.296	162.658	-8.455
SJL-15-26	458785.14	2902057	0.328	132.394	2.5	71.304	1.714	27.1	0.565	100.683	135.222	-14.641

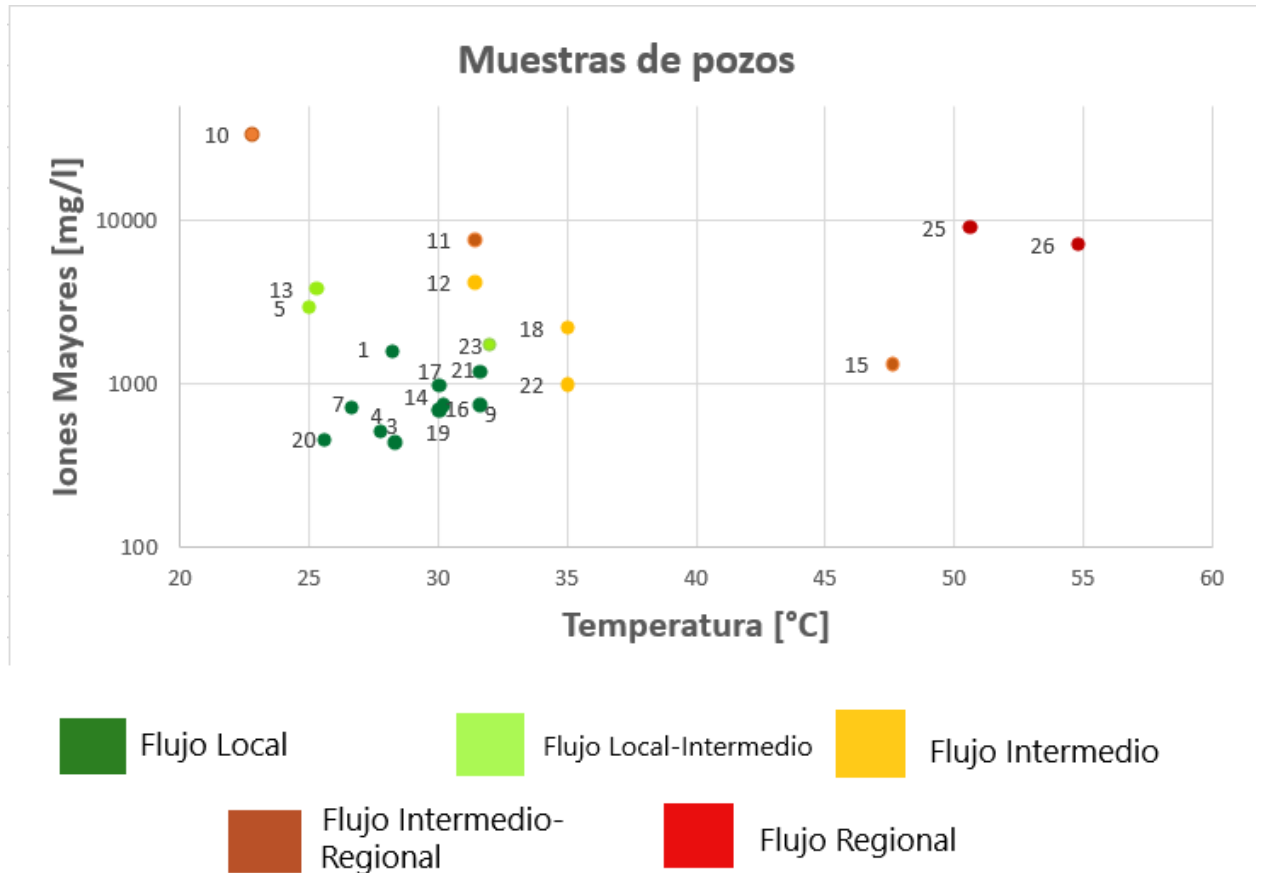


Figura 3.4: Gráfica de iones mayores contra temperatura de las muestras de agua (IGF, 2015).

La zona de Agua Caliente (Fig. 3.3) es la que concentra la mayor cantidad de muestras de agua de tipo intermedio a regional. Se tiene como antecedente una serie de estudios con interés en exploración geotérmica. En el informe “Estudio de resistividad y gravimetría en la zona de Santispec, el Centavito, BCS y Santiago Papasquiario, Dgo.”⁴ se realizaron 15 sondeos eléctricos verticales (SEV) y se reportó que el acuífero explotado está contenido en los materiales aluviales y en la Formación Salada y que la unidad fracturada en la Formación Comondú es la zona de interés hidrotermal. Posteriormente, Casarrubias-Unzueta et al. (1994) reportaron una composición química del agua en la zona de Agua Caliente de tipo clorurado-sódico y temperatura de 136 °C por medio de geotermómetro de K-Mg y de 176 °C con el geotermómetro de K-Na. Además, suponen que las manifestaciones termales están relacionadas con fallas en dirección NO-SE que intersectan al sistema estructural NE-SO. Hacen una propuesta para la localización de un pozo exploratorio (AC-1) en la zona de Agua Caliente. El estudio

⁴Comisión Federal de Electricidad. 1996. Estudio de resistividad y gravimetría en la zona, BCS, Santiago Papasquiario, DGO y Agua Caliente, BCS. Contrato CLS-GPG-3002/96.

“Propuesta de profundización del pozo AC-1, en la zona de Agua Caliente, BCS”⁵ sugiere profundizar el pozo AC-1 zona de Agua Caliente hasta 1000 m para fines exploratorios.

Los datos geoquímicos de agua utilizados en el presente trabajo son producto de investigaciones en exploración de zonas con potencial geotérmico por parte del Departamento de Recursos Naturales del IGF, UNAM. De acuerdo con la Figura 3.3, se puede observar una relación de las características del agua en la zona de Agua Caliente con un sistema de fallas normales con dirección NO que se encuentran al sur del sitio. Es posible que dicho flujo intermedio-regional haya ascendido por la permeabilidad que permite el sistema de fallas mencionado. Cabe resaltar que en otros sitios donde se observa presencia de flujo intermedio podría ser por una sobreexplotación al Acuífero de SJBL.

⁵Comisión Federal de Electricidad. 2000. Propuesta de profundización del pozo AC-1, en la zona de agua caliente, BCS. Reporte DEX-01/2000. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos Subgerencia de Estudios, Departamento de Exploración.

Tabla 3.2: Asignación de sistema de flujo subterráneo a las muestras del IGF.

Pozo	Temperatura [°C]	Iones mayores [mg/l]	Sistema de flujo subterráneo
SJL-15-01	28.2	1582.9	Local
SJL-15-03	28.3	438.3	Local
SJL-15-04	27.8	504	Local
SJL-15-05	25	2927.75	Local-Intermedio
SJL-15-07	26.6	709.21	Local
SJL-15-09	31.6	733.63	Local
SJL-15-10	22.8	33 715.6	Inter.-Regional
SJL-15-11	31.4	7617	Inter.-Regional
SJL-15-12	31.4	4129.9	Intermedio
SJL-15-13	25.3	3819.76	Local-Intermedio
SJL-15-14	30.2	735.32	Local
SJL-15-15	47.6	1324.51	Inter.Regional
SJL-15-16	30	680.86	Local
SJL-15-17	30	956.68	Local
SJL-15-18	35	2195.6	Intermedio
SJL-15-19	30	687.35	Local
SJL-15-20	25.6	457.3	Local
SJL-15-21	31.6	1178.92	Local
SJL-15-22	35	987.22	Intermedio
SJL-15-23	32	1725.41	Local-Intermedio
SJL-15-25	50.6	8940.7	Regional
SJL-15-26	54.8	7095.87	Regional

3.3.3. Diagrama de Piper Hill Langellier

El diagrama de Piper aporta información preliminar de la composición geoquímica del agua subterránea. Por lo tanto, se considera una herramienta que puede ayudar a entender en qué fase de evolución se encuentra el agua subterránea. Este método consta gráficamente de dos diagramas triangulares y de un diagrama tipo rombo, los cuales se utilizan para representar la composición de una muestra de agua. A cada vértice del diagrama triangular le está asignado un catión (Ca, Mg, Na+K), de igual forma para los vértices del otro triángulo pero esta vez con anio-

nes (HCO_3 , SO_4 y Cl). Antes de graficar, se deben normalizar los componentes iónicos, de tal modo que la suma de los tres componentes, aniones y cationes por separado, representen el 100 %. Los vértices del triángulo simbolizan el 100 % del ión correspondiente. Así mismo, los lados opuestos a dicho vértice representan el 0 %.

Se grafica un punto que describa el porcentaje de la composición de cada uno de los tres iones. Una vez graficado en ambos triángulos, se unen los puntos de ambos triángulos hasta su intersección en el rombo superior, donde se representa a la vez la composición en cationes y aniones. En dicho rombo, cada uno de sus vértices representa una composición geoquímica del agua. Al vértice inferior le constituyen aguas de tipo bicarbonatadas sódicas, las cuales tienden a ser aguas de reciente infiltración al subsuelo y que tienen gran potencial de intercambio iónico. El vértice izquierdo corresponde con aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, asociadas a rocas carbonatadas y cristalinas. El vértice derecho corresponde a aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas, las cuales se relacionan con agua de mar, salmueras y/o sedimentarias, además se consideran aguas en equilibrio iónico con su entorno. El vértice superior está relacionado con aguas sulfatada y/o clorurada/cálcicas y/o magnésicas, las cuales se asocian con un gran intercambio iónico y pueden estar en interacción con minerales oxidables ya que no están en equilibrio.

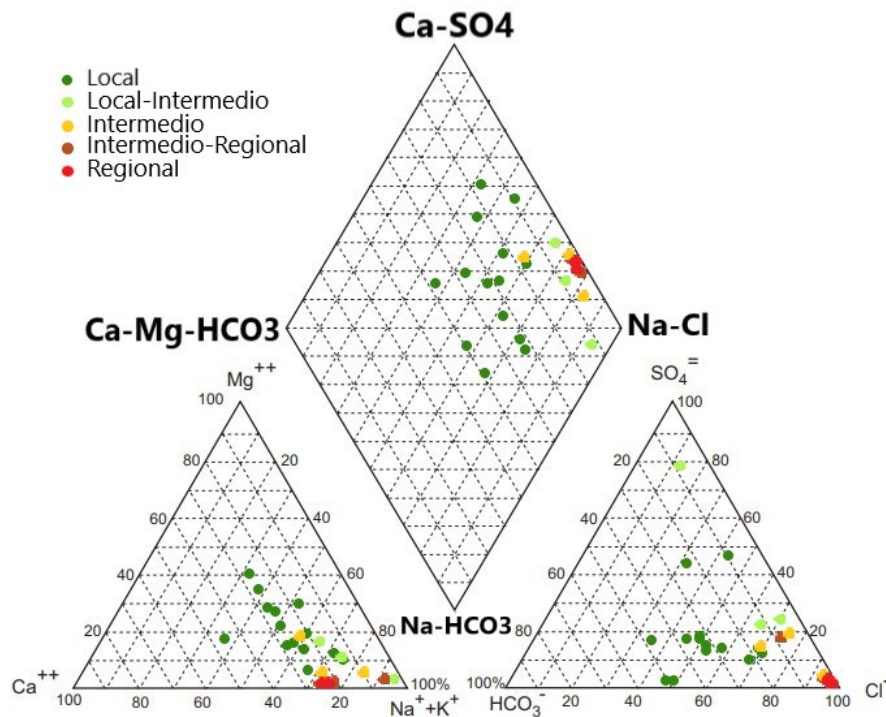


Figura 3.5: Diagrama Piper para las muestras de IGF (2015).

Se graficaron las muestras del IGF del año 2015 (Figura 3.5) con el objetivo de conocer variaciones en el agua por mezclas y su evolución. Se observa que las

muestras se agrupan en la zona correspondiente a aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas con una ligera inclinación mixta. Esta tendencia en la composición geoquímica del agua se le relaciona con agua de mar, salmueras y/o sedimentaria, así mismo esta composición en el agua podría significar que es agua con un mayor grado de evolución y permanencia en el acuífero. Además, este tipo de agua subterránea podría sugerir la presencia de intrusión salina.

3.4. Elevación y Profundidad del nivel estático

El nivel estático representa una condición importante en la construcción del modelo de flujo subterráneo. Es a partir de este nivel que se conoce el nivel del agua subterránea real sin la operación de los pozos cercanos. En el caso del Valle de SJBL se tiene registro del nivel estático de dos estudios, el primero del año 1986 realizado por el Instituto de Geofísica⁶ y el segundo realizado por Lesser (2006). Se presenta el nivel estático en términos de la elevación y de la profundidad. El valor de elevación muestra los metros sobre el nivel del mar en donde se encuentra el nivel estático. Por otro lado, la profundidad es la distancia vertical medida desde la superficie del terreno al nivel estático del agua en metros. Se seleccionó un número de pozos que reportan ambos trabajos para evaluar su cambio en el tiempo. En ambos trabajos se observan los niveles de agua correspondientes con el acuífero libre del valle perteneciente al Acuífero de SJBL, además se tiene contemplada la presencia de un parteaguas hidráulico que separa al Valle de SJBL y la zona conocida como San Bruno, la cual tiene desembocadura hacia el Golfo de California.

Los niveles estáticos reportados varían entre los 20 y 30 m de profundidad en el Valle de SJBL, más cerca de la costa, por la zona de San Bruno los niveles son más someros entre 5 y 10 m. A partir de las observaciones realizadas de los datos tomados del estudio realizado por el IGF en el año de 1986⁶ y de Lesser (2006) se observan variaciones del flujo subterráneo en la ranchería de Santa Rosa, en donde se tienen varios pozos para sostener la actividad agrícola y en la localidad de San Juan Bautista Londó (Figuras 3.6 y 3.7).

⁶Instituto de Geofísica. 1986. Estudio Geohidrológico-Geofísico en la cuenca de San Juan Bautista Londó, Municipio Comondú, Reporte para SARH, México: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, México.

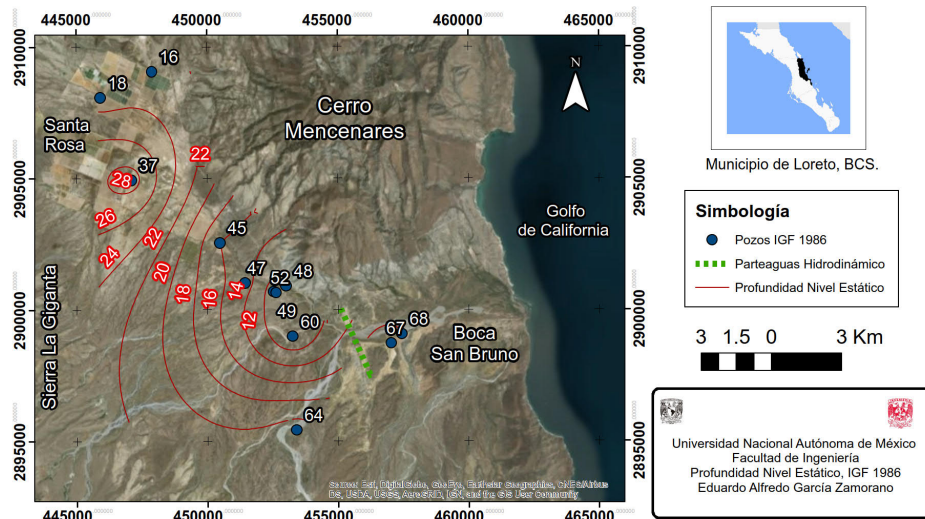


Figura 3.6: Profundidad del Nivel estático en SJBL (IGF, 1986).

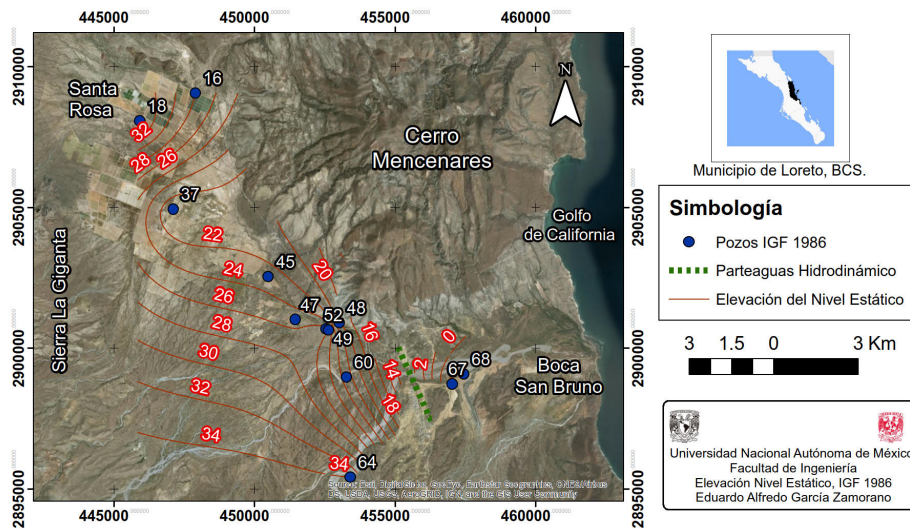


Figura 3.7: Elevación del Nivel estático en SJBL (IGF, 1986).

En el estudio de Lesser (2006) el nivel estático varía entre los 30 y 17 m de profundidad. En los pozos de la localidad de SJBL y en la rancharía de Santa Rosa es en donde se observan variaciones del nivel estático (Figuras 3.8 y 3.9) con respecto a los niveles de 1986. En el lapso de 1986 a 2006 se observa un abatimiento promedio de 2 m para la rancharía de Santa Rosa y de 5 m en la localidad de SJBL.

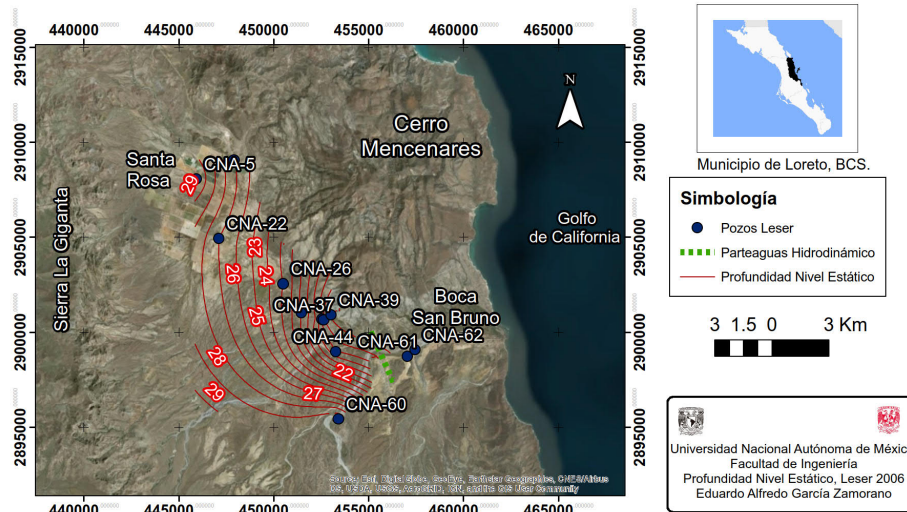


Figura 3.8: Profundidad del Nivel estático en SJBL (Lesser, 2006).

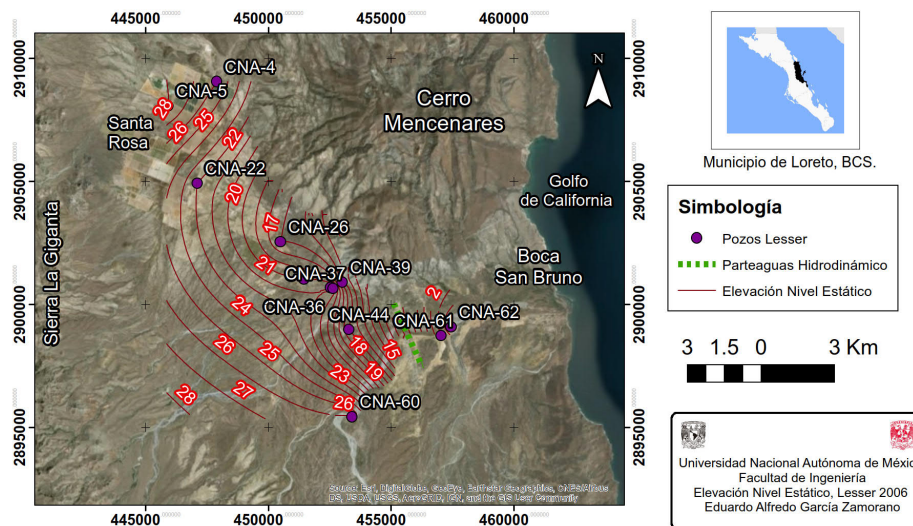


Figura 3.9: Elevación del Nivel estático en SJBL (Lesser, 2006).

3.5. Unidades hidroestratigráficas

La principal unidad hidroestratigráfica y la más somera es el acuífero libre en el material granular del Valle de SJBL. Esta unidad es de donde se obtiene el agua para el uso doméstico, la actividad agrícola y otros usos en la región. Tiene una profundidad media de 25 m al nivel freático y un espesor de poco más de 200 m. Esta unidad hidroestratigráfica está comprendida en la unidad litológica del

aluvión, las unidades sedimentarias del pie de monte, los abanicos aluviales y el miembro superior de la Formación Salada.

Subyace un cuerpo confinante de carácter arcilloso que cubre parcialmente al valle con un espesor variable a una profundidad de 200 m⁷. Esta capa está constituida por depósitos semiconsolidados de permeabilidad variable con contenido de material arcilloso que se comporta como un acuitardo. De acuerdo con los perfiles electromagnéticos realizados por Arroyo (2018), dicha unidad se encuentra en la porción centro norte del valle a una profundidad aproximada de 140 m y se reporta un espesor aproximado de 40 m.

La unidad hidrogeológica que la subyace está compuesta por areniscas y conglomerados de origen marino con fósiles de la Formación Salada. Esta unidad es de tipo confinado a semiconfinado y en ocasiones libre. Los sedimentos son semiconsolidados y tienen una permeabilidad media, además es posible que tenga permeabilidad secundaria por medio de fracturas generadas durante la tectónica activa de la cuenca de Loreto. Se alterna con material calcáreo y material terrígeno (Lesser, 2006).

A esta unidad le subyace un acuífero en rocas fracturadas constituido por los materiales vulcanosedimentarios, las brechas volcánicas y lavas de la Formación Comondú. Originalmente estos materiales son de baja o nula permeabilidad. Sin embargo, el medio fracturado permite la recarga y circulación de agua por medio de la Sierra La Giganta. Se desconoce hasta donde llega el horizonte de esta unidad debido a la falta de información y complejidad geológica de la Formación Comondú. Sin embargo se contempla que la base de esta unidad hidroestratigráfica sea el límite del Acuífero de SJBL. Se registraron caudales entre 11 y 22 lps en los 4 mejores pozos en las faldas de la Sierra La Giganta. A pesar de que los reportes conocidos acerca del caudal en la unidad hidroestratigráfica fracturada se registraron dentro del área administrativa del Acuífero de Loreto, es por la cercanía y la similitud de geología en el subsuelo que se suponen las mismas condiciones dentro del Acuífero administrativo de SJBL.

En la Figura 3.10 se muestra un esquema de las unidades hidroestratigráficas del Valle de SJBL en la cercanía a la rancharía de Santa Rosa, donde se ubican pozos de riego para la actividad agrícola. Se muestran los pozos (16, 18 y 37) en el valle, de los cuales se obtuvo información de las profundidades de extracción⁷.

⁷Instituto de Geofísica. 1986. Estudio Geohidrológico-Geofísico en la Cuenca de San Juan Bautista Londó, Municipio Comondú, Reporte para SARH, México: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, México.

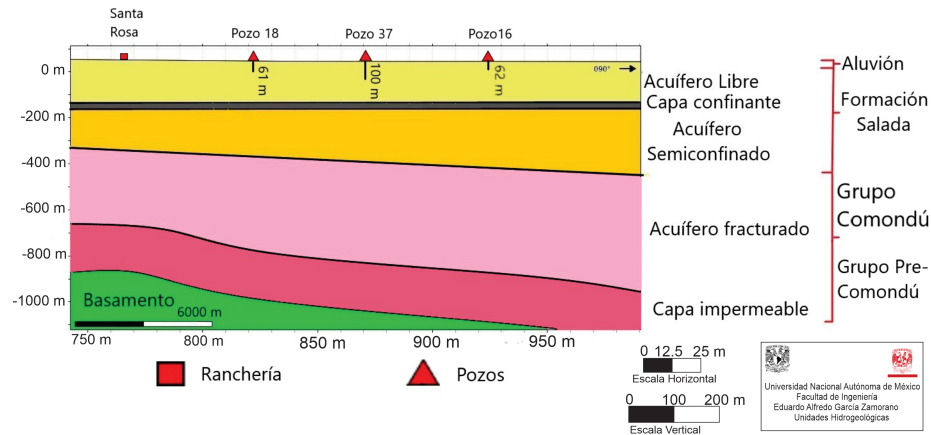


Figura 3.10: Esquema de la disposición de las unidades hidroestratigráficas en el Valle de SJBL.

3.6. Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos reportados por Lesser (2006) son limitados para poder configurar los parámetros hidráulicos del modelo y realizar la simulación. De tal modo, en el presente estudio se implementaron ecuaciones y se consultaron diversas fuentes para completar la configuración faltante. Para la unidad del acuífero libre se obtuvo la conductividad hidráulica tomando un promedio de las pruebas de pozo con el método Hantush elaboradas por Lesser (2006) (Tabla 3.3). Se tomo en cuenta un espesor promedio del acuífero libre de 200 m y se calculó la conductividad hidráulica con la transmisividad (T) de dichas pruebas de bombeo a partir de la siguiente Ecuación:

$$T = \text{Conductividadhidraulica}(k) * \text{Espesor}(b) \quad (3.1)$$

Donde k es la conductividad hidráulica y b el espesor del acuífero. Se despeja la Ecuación 3.1 y queda de la siguiente manera:

$$k = \frac{T}{b} \quad (3.2)$$

Tabla 3.3: Cálculo de la conductividad hidráulica a partir de la Ecuación (3.2).

Unidad acuífero Libre			
Pozo	Transmisividad [m/d]	Espesor [m]	Conductividad hidráulica [m/d]
CNA-2	217	200	1.085
CNA-3	285	200	1.425
CNA-6	686	200	3.43
CNA-8	630	200	3.15
CNA-10	3540	200	17.7
CNA-12	1309	200	6.55
CNA-15	44.5	200	0.22
CNA-21	101	200	0.5
CNA-40	215	200	1.07
CNA-41	304	200	1.52
CNA-42	16.8	200	0.08
CNA-43	453	200	2.26
CNA-97	26.2	200	0.13
CNA-98	41.2	200	0.21
Promedio			2.81

De la Ecuación 3.2 se obtuvieron los diferentes valores de conductividad hidráulica de los pozos a los que se les efectuó una prueba de bombeo. El promedio de esos valores dio una conductividad hidráulica de 2.81025 m/d. Sin embargo, se tomó en cuenta la bibliografía para tener un rango de conductividades hidráulicas al momento de calibrar el modelo. De tal manera que el rango va de 2.81025 a 1×10^{-5} m/d (Freeze et al., 1979). De acuerdo a la bibliografía el material compuesto por arena limosa, limos y arena limpia podría contar con valores de conductividades de tal magnitud. Además, la poca selección del material granular en el valle permite tener un rango tan amplio de conductividades hidráulicas. Para el coeficiente de almacenamiento (S) de la unidad de acuífero libre se consideró el estimado por Lesser (2006) que es de 0.01. Para el parámetro de almacenamiento específico (Ss) y el rendimiento específico (Sy) se usaron bases de datos en la literatura disponible (Morris et al. 1967; Domenico et al., 1972; Domenic et al., 1990). En contraste, para la obtención del coeficiente de almacenamiento para el resto de

unidades hidroestratigráficas se implementó la Ecuación 3.3.

$$S = S_s * b \quad (3.3)$$

Donde S es el coeficiente de almacenamiento, S_s el almacenamiento específico y b el espesor del acuífero.

Los parámetros hidráulicos asignados para cada unidad hidrogeológica se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Parámetros hidráulicos para las diferentes unidades hidroestratigráficas del Valle de SJBL.

Unidad hidroestratigráfica	Conductividad hidráulica k [m/d]	Rendimiento específico (S_y)	Coef. de almacenamiento (S)	Almacenamiento específico (S_s)	Espesor promedio [m]
Acuífero libre	2.81025 a 1×10^{-5}	0.33	0.01	0.00005	200
Capa confinante	1×10^{-11} a 4.7×10^{-9}	0.06	0.104	0.0026	40
Acuífero semiconfinante	9×10^{-7} a 5×10^{-4}	0.32	0.026	0.00013	200
Acuífero fracturado	8×10^{-9} a 3×10^{-4}	0.21	0.00099	0.0000033	300

3.7. Identificación de fuentes y/o sumideros

De acuerdo con la información obtenida del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA)⁸ se tiene concesionado un volumen de extracción de $7.4631 \text{ hm}^3/\text{año}$ ($7\,463\,142 \text{ m}^3/\text{año}$) y 52 aprovechamientos de agua subterránea. En la Tabla 3.5 se observan los diferentes usos que se les da a los aprovechamientos dentro del área administrativa del Acuífero de SJBL.

Tabla 3.5: Volumen concesionado y usos de los aprovechamientos reportados por REPDA.

Uso	Extracción $\text{hm}^3/\text{año}$	Porcentaje de extracción
Agrícola	1.81	24.27 %
Diferentes Usos	2.53	33.95 %
Pecuario	0.02	0.23 %
Público Urbano	2.95	39.59 %
Servicio	0.15	1.96 %
Total	7.47	100 %

⁸Fecha de corte en Septiembre de 2019.

Las actividades públicas urbanas son el principal uso de agua con un porcentaje de 39.5 %, seguido por la actividad agricultora con un porcentaje de 24.2 %. Así mismo, los pozos reportados por REPDA no solo abarcan el área de estudio, sino que abarcan toda el área administrativa del Acuífero de SJBL como se observa en la Figura 3.11.

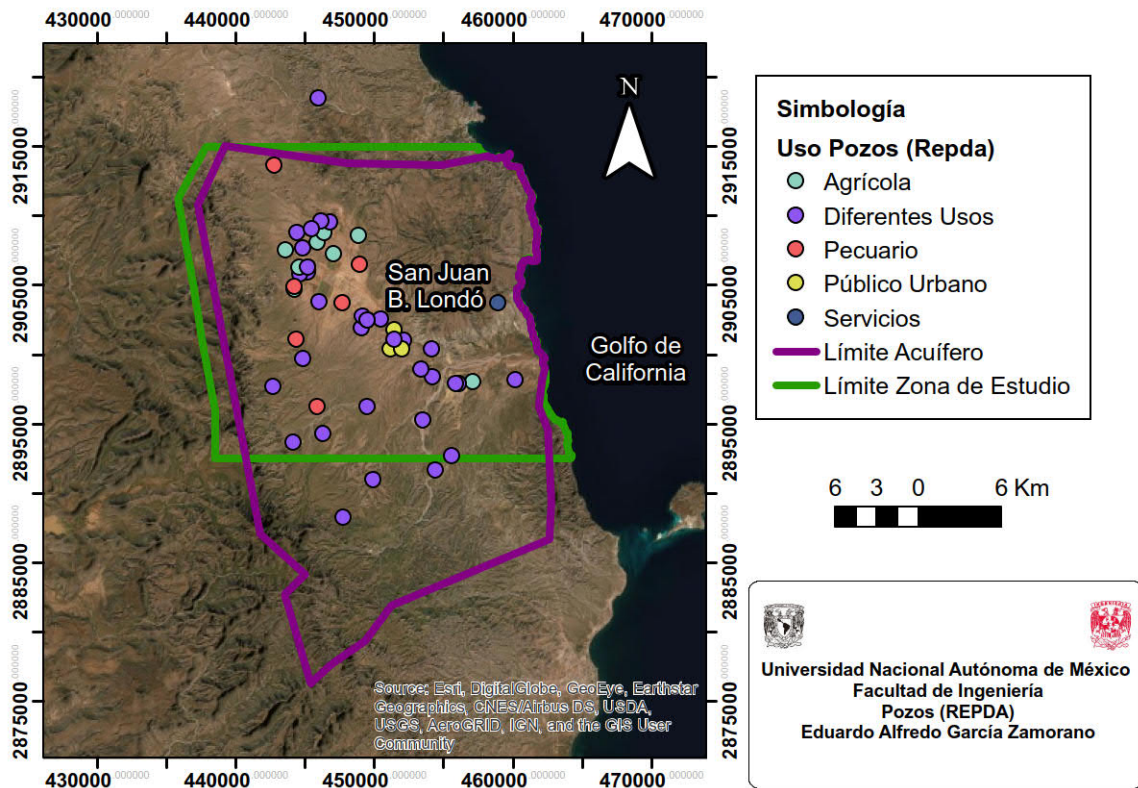


Figura 3.11: Censo de aprovechamientos de agua (REPDA).

3.8. Balance de aguas subterráneas

El balance de aguas subterráneas se realizó a partir de la diferencia entre la suma total de las entradas (recargas) y la suma total de las salidas (descargas) del sistema. El resultado de dicha diferencia representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en un tiempo definido.

$$\text{Recargas totales} - \text{Descargas totales} = \text{Cambio de almacenamiento} \quad (3.4)$$

Se desarrolló el balance de agua subterránea en un lapso de tiempo de 1986 a

2006, ya que la información piezométrica disponible son de los trabajos del IGF⁹ y de Lesser (2006). Se tomó en cuenta para el balance en el año 2006 que el área del Valle central de SJBL y la desembocadura de San Bruno son zonas sin conexión hidráulica. Lesser (2006) realizó un balance de aguas subterráneas tomando en cuenta los mismos criterios. Sin embargo, en este estudio se plantea además realizar un balance de aguas subterráneas para el año 1986.

3.8.1. Entradas

La recarga total se define como la suma de las entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) y la recarga vertical (Rv). Esta última comprende los valores de la precipitación por lluvia y por los escurrimientos superficiales del río de San Juan y los arroyos afluentes. De tal manera que la diferencia para calcular el cambio de almacenamiento ($\pm\Delta V(s)$) queda de la siguiente forma:

$$Eh + Rv - \text{Salidas totales} = \pm\Delta V(s) \quad (3.5)$$

Recarga vertical (Rv)

La recarga vertical al acuífero libre de SJBL ocurre por medio de infiltración de agua de lluvia a través del material granular del valle y por medio de las fracturas de la Sierra La Giganta. El volumen de agua que recarga al acuífero por medio de recarga vertical, se calculó como el producto de la lámina de lluvia promedio anual, el coeficiente de infiltración y el área de las unidades hidrogeológicas. La Ecuación es la siguiente:

$$Rv = PciA \quad (3.6)$$

Donde Rv es la Recarga Vertical, P es la Precipitación en m/año, ci es el Coeficiente de Infiltración y A es el Área de Recarga. Para la región se tomó una precipitación promedio anual de 219.7 mm (Sección 1.6.1), el coeficiente de infiltración se calculó consultando el “Manual de Instrucciones de Estudios Hidrológicos”¹⁰. Se obtuvo como resultado para el Valle de SJBL un coeficiente de 0.07 y para la zona de San Bruno de 0.2. Los coeficientes fueron propuestos así debido a que en el valle hay material arcilloso de baja permeabilidad que complica la infiltración,

⁹Instituto de Geofísica. 1986. Estudio Geohidrológico-Geofísico en la cuenca de San Juan Bautista Londó, Municipio Comondú, Reporte para SARH, México: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, México.

¹⁰Organización Meteorológica Mundial, 1972, Manual de Instrucciones, Estudios Hidrológicos, Programa para el Desarrollo, Proyecto de Ampliación y Mejoramiento de los Servicios Hidrometeorológicos e Hidrológicos en el Istmo Centroamericano, Publicación No. 70.

mientras que en la desembocadura el material en el subsuelo es de una mayor permeabilidad. Finalmente se consideró un área de 80.92 km² en el Valle de SJBL y de 19.29 km² en la desembocadura de San Bruno. El valor para la recarga vertical para SJBL es de 2852.37 m³/d y en San Bruno de 1942.73 m³/d con un total de 4795.10 m³/d para el área de estudio. Lesser (2006) obtuvo una recarga vertical de 4383.56 m³/d para el área del Acuífero de SJBL, a partir de despejar la Ecuación 3.5, tal como se muestra a continuación en la Ecuación 3.7:

$$Rv = \text{Salidas totales} \pm \Delta V(s) - Eh \quad (3.7)$$

Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Parte de la lluvia recarga desde una zona alta y desciende en forma de flujo horizontal a través de las fracturas y poros de las rocas hasta llegar a una zona baja, donde se incorpora al acuífero. De tal manera, ese volumen de agua es un elemento importante de recarga para contemplar en el balance de agua subterránea. La entrada de flujo horizontal de agua subterránea en el acuífero libre del Valle de SJBL se lleva a cabo en la zona sur y norte del valle, y en la zona denominada como piedemonte al oeste del valle. Para conocer una aproximación al volumen de agua que se ingresa y descarga en el subsuelo del acuífero se utiliza la ley de Darcy. Dicha ley establece que la velocidad que tiene un fluido en medio poroso es proporcional al gradiente hidráulico (diferencias de cargas hidráulicas) a través del coeficiente de permeabilidad (Freeze et al., 1975). La Ley de Darcy se presenta a continuación:

$$Q = kiA \quad (3.8)$$

Donde Q es el Gasto de agua en m³/s que tiene el agua subterránea en un medio poroso. k en m/s representa el parámetro de conductividad hidráulica, el cual define la distancia que avanza un fluido en función del tiempo y varía con respecto al material por el que atraviesa el fluido. i es el gradiente hidráulico que se define como la pérdida de carga hidráulica ($h_1 - h_2$) en una distancia conocida (l). A en m² es la sección o el área transversal del medio poroso por el cual el agua fluye (Freeze et al., 1975).

Cuando el agua se infiltra verticalmente en el subsuelo, esta atraviesa una cierta distancia vertical a través de distintos materiales. Para aplicar la Ley de Darcy en esta situación se necesita definir la Transmisividad. La transmisividad representa la tasa de flujo bajo un gradiente de presiones que se infiltra en un acuífero de área definida a través de un espesor saturado (Ecuación 3.9).

$$T = kb \quad (3.9)$$

Si despejamos k de la Ecuación 3.9 nos queda de la siguiente manera:

$$k = \frac{T}{b} \quad (3.10)$$

Así mismo reemplazamos k de la Ecuación 3.8 por la k de la Ecuación 3.10, queda la siguiente Ecuación:

$$Q = TBi \quad (3.11)$$

Donde B representa la extensión o el largo (perpendicular a la dirección del flujo) por el cual el flujo se infiltrará al subsuelo. Se llevó a la práctica la Ley de Darcy tomando un mapa con curvas de los niveles estáticos para el año 1986¹¹ (Figura 3.12) y otro para 2006 (Figura 3.13) (Lesser, 2006). Se subdividieron las curvas de nivel tal como se muestra en dichas Figuras con un largo y ancho de cada celda, además se calcularon los gradientes hidráulicos para cada una de las celdas.

Para el caso del año 1986 se consideraron un total de 33 celdas en el Valle de SJBL (entrada) y 8 celdas en la desembocadura de San Bruno (salida), con un total de 41 celdas (Figura 3.12). Se tomaron los valores de transmisividad que aparecen en las pruebas de bombeo del IGF¹¹ como referencia y se calcularon las entradas por flujo subterráneo (Tabla 3.6) y las salidas subterráneas hacia el mar (Tabla 3.7).

¹¹Instituto de Geofísica. 1986. Estudio Geohidrológico-Geofísico en la cuenca de San Juan Bautista Londó, Municipio Comondú, Reporte para SARH, México: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, México.

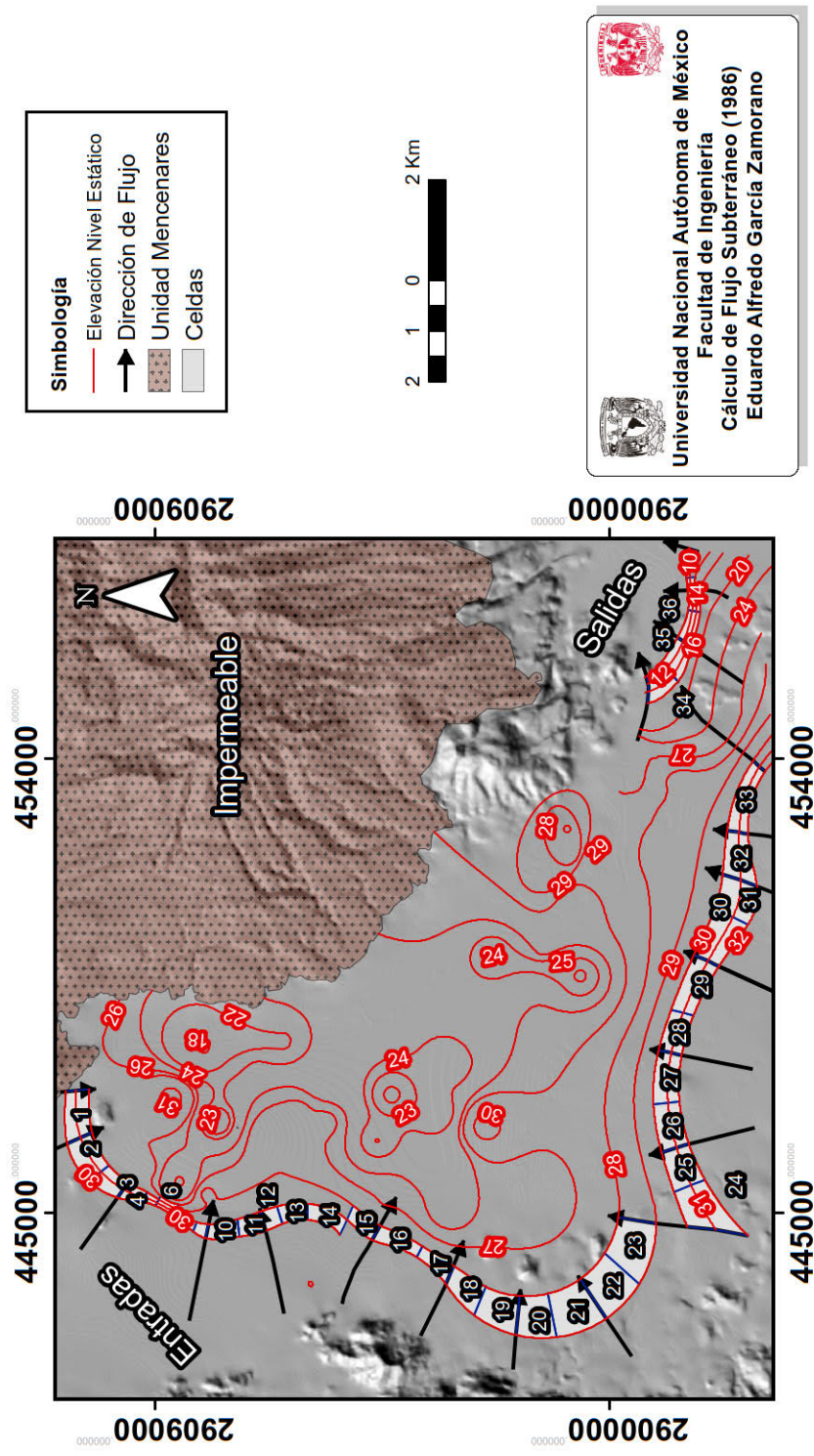


Figura 3.12: Cálculo de Flujos subterráneos para el año 1986.

Tabla 3.6: Cálculo de entrada por flujo subterráneo horizontal en el Valle de SJBL, BCS para el año 1986.

Celda	Ancho [m]	Largo [m]	$h_1 - h_2$	Gradiente hidráulico [i]	Transmisividad [m ² /s]	Caudal [m ³ /s]	Volumen [m ³ /d]
1	505.5	953.5	2	0.004	0.00033	0.0012	107.20
2	527	802.5	2	0.004	0.00033	0.0010	86.55
3	442	587	2	0.005	0.00033	0.0009	75.48
4	293	469.5	2	0.007	0.00003	0.0001	8.67
5	173	264.5	2	0.012	0.00003	0.0001	8.27
6	249.5	410	3	0.012	0.00003	0.0002	13.33
7	218	232	2	0.009	0.00003	0.0001	5.76
8	164	230	1	0.006	0.00003	0.0000	3.79
9	249	260.5	1	0.004	0.00003	0.0000	2.83
10	420	624	1	0.002	0.00072	0.0011	91.91
11	374.5	652	1	0.003	0.00072	0.0012	107.70
12	377.5	347.5	1	0.003	0.00072	0.0007	56.95
13	350.5	552.5	1	0.003	0.00035	0.0006	47.68
14	327	797.5	1	0.003	0.00086	0.0021	182.00
15	317.5	655.5	1	0.003	0.00176	0.0036	313.41
16	285.5	942	1	0.004	0.00176	0.0058	500.88
17	313.5	762	1	0.003	0.00273	0.0066	572.90
18	502	805.5	1	0.002	0.00273	0.0044	378.20
19	701.5	803.5	1	0.001	0.00167	0.0019	165.27
20	833	692.5	1	0.001	0.00167	0.0014	119.95
21	910	882	1	0.001	0.00167	0.0016	139.85
22	929	831.5	1	0.001	0.00167	0.0015	129.14
23	840.5	1013	1	0.001	0.00167	0.0020	173.90
24	941.5	1072.5	2	0.002	0.00167	0.0038	328.73
25	612	802	2	0.003	0.00167	0.0044	378.17
26	542	913.5	2	0.004	0.00167	0.0056	486.37
27	497.5	996	2	0.004	0.00167	0.0067	577.73
28	466	837	2	0.004	0.00167	0.0060	518.32
29	500	1136	2	0.004	0.00167	0.0076	655.64
30	636	1002	2	0.003	0.00167	0.0053	454.64
31	732.5	765	2	0.003	0.00167	0.0035	301.38
32	577.5	955	2	0.003	0.00167	0.0055	477.21
33	371	1400	2	0.005	0.00167	0.0126	1088.97
						Total	8558.77

Tabla 3.7: Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal en el Valle de SJBL, BCS para el año 1986.

Celda	Ancho [m]	Largo [m]	$h_1 - h_2$	Gradiente hidráulico [i]	Transmisividad [m ² /s]	Caudal [m ³ /s]	Volumen [m ³ /d]
34	529.5	591.5	6	0.011	0.001	0.007	579.10
35	428	657.5	6	0.014	0.001	0.009	796.37
36	294	647.5	6	0.020	0.001	0.013	1141.71
37	239.5	229.5	6	0.025	0.001	0.006	496.75
38	244	182.5	6	0.025	0.001	0.004	387.74
39	165.5	249	4	0.024	0.001	0.006	519.97
40	89.5	238	2	0.022	0.001	0.005	459.51
41	127	340	2	0.016	0.001	0.005	462.61
Total							4843.77

La recarga por flujo subterráneo (Eh) en el Valle de SJBL es de 8558.77 m³/d y las salidas subterráneas de 4843.77 m³/d en San Bruno. Resulta pertinente indicar que para el año 1986 las salidas subterráneas del valle sucedían de manera natural con descarga hacia el mar, pasando por la desembocadura de San Bruno. No obstante, la sobreexplotación modifica la mecánica del agua subterránea y para el año 2006 se reportó un parteaguas hidrodinámico entre el valle y la desembocadura, además de que la costa se ve afectada por una intrusión salina y la descarga subterránea hacia el mar tiene un volumen comprometido.

Por otro lado, para el caso del año 2006 se realizaron un total de 17 celdas en el Valle de SJBL y 6 celdas en la zona San Bruno, con un total de 23 celdas como se observa en la Figura 3.13. Se tomaron los valores de transmisividad que Lesser (2006) reporta en las pruebas de bombeo que realizó (Tabla 3.8 y 3.9).

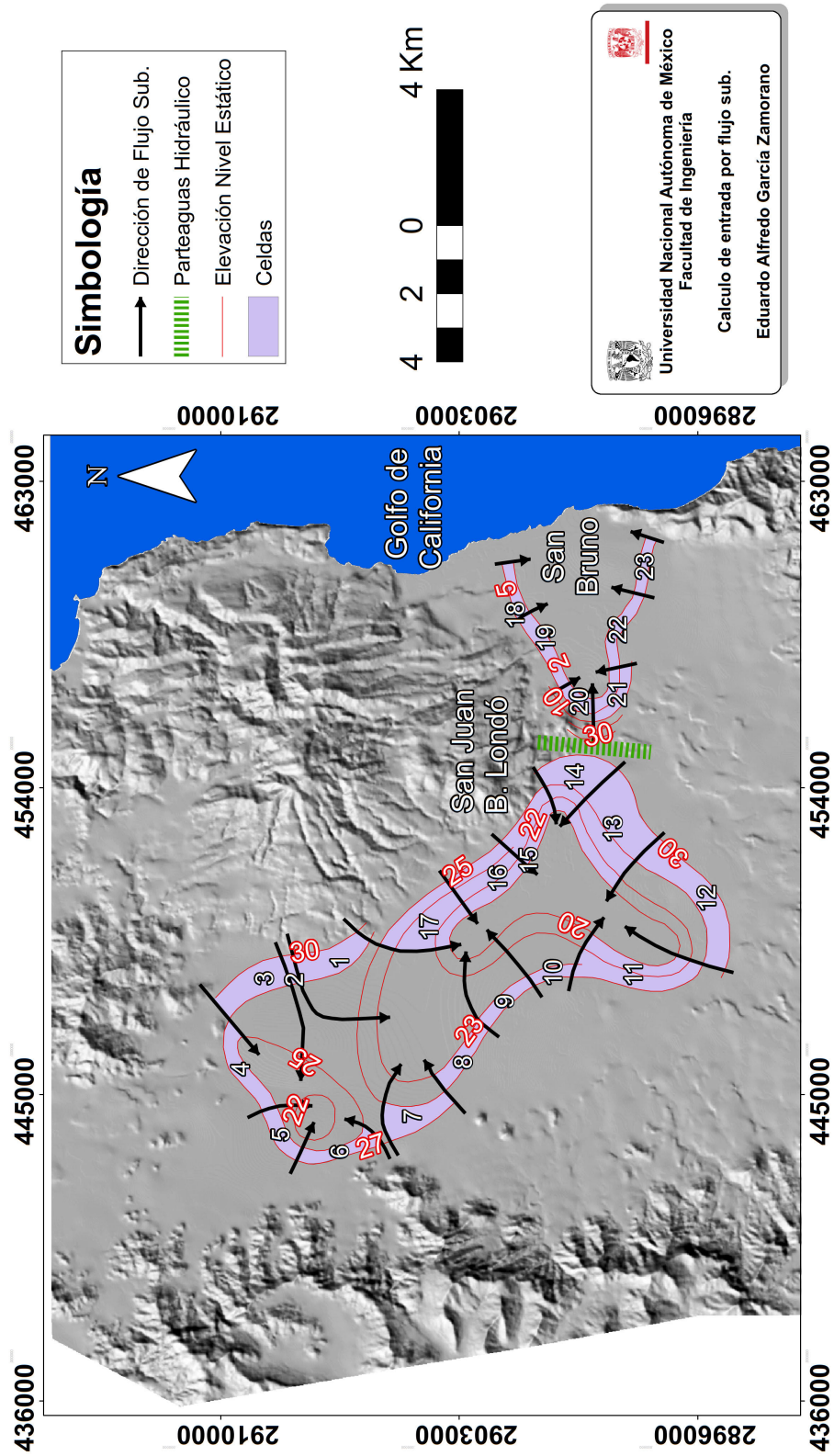


Figura 3.13: Cálculo de Flujos subterráneos para el año 2006.

Tabla 3.8: Cálculo de entrada por flujo subterráneo horizontal en el Valle de SJBL, BCS para el año 2006.

Celda	Ancho [m]	Largo [m]	$h_1 - h_2$ [m]	Gradiente hidráulico [i]	Transmisividad [m ² /s]	Caudal [m ³ /s]	Volumen [m ³ /d]
1	678.49	2256.16	3	0.0044	0.0004	0.004	344.76
2	897.31	331.51	3	0.0033	0.001	0.001	47.88
3	830.64	2350.10	3	0.0036	0.0005	0.008	733.35
4	554.98	2769.07	2	0.0036	0.001	0.010	862.19
5	436.17	1711.65	2	0.0046	0.001	0.008	678.12
6	585.95	2370.44	2	0.0034	0.001	0.008	699.06
7	824.19	2126.97	2	0.0024	0.0005	0.003	222.97
8	507.81	2183.06	2	0.0039	0.0005	0.004	371.43
9	428.65	1886.82	2	0.0047	0.0008	0.007	608.50
10	374.77	1330.52	2	0.0053	0.0008	0.006	490.79
11	1126.50	3567.82	5	0.0044	0.001	0.016	1368.21
12	790.12	4383.47	5	0.0063	0.001	0.028	2396.68
13	2034.73	2494.04	10	0.0049	0.0005	0.006	529.52
14	1671.75	1497.18	10	0.0060	0.0002	0.002	154.76
15	978.49	1999.16	5	0.0051	0.0001	0.001	88.26
16	1148.24	2083.30	5	0.0044	0.0001	0.001	78.38
17	1654.68	2015.96	5	0.0030	0.0001	0.001	52.63
						Total	9727.49

Tabla 3.9: Cálculo de entrada por flujo subterráneo horizontal para San Bruno, BCS para el año 2006.

Celda	Ancho [m]	Largo [m]	$h_1 - h_2$ [m]	Gradiente hidráulico [i]	Transmisividad [m ² /s]	Caudal [m ³ /s]	Volumen [m ³ /d]
18	405.45	1655.60	3	0.007	0.0004	0.005	423.37
19	376.52	2388.02	3	0.008	0.0004	0.008	657.58
20	367.38	1096.36	3	0.008	0.0004	0.004	309.40
21	716.86	1652.67	8	0.011	0.0004	0.007	637.41
22	343.93	2452.52	3	0.009	0.0004	0.009	739.32
23	327.30	1709.02	3	0.009	0.0004	0.006	541.37
						Total	3308.45

La recarga por flujo subterráneo (Eh) en el Valle de SJBL es de 9727.49 m³/d y de 3308.45 m³/d en San Bruno, con un total de 13 035.94 m³/d.

3.8.2. Salidas

Evapotranspiración

El término evapotranspiración (ETR) hace referencia a la acción del agua de evaporarse a la atmósfera o ser transpirada por la vegetación. Por lo tanto, se le considera como una descarga en el sistema. Para este trabajo se consideró un valor de ETR de cero. Cuando los niveles estáticos del agua se encuentran por debajo de los 10 m se considera que no existe una descarga por este concepto (Lesser, 2006).

Bombeo

La extracción para el año 1986, según IGF¹², es de 33 205.47 m³/d, sin embargo, desde el criterio del presente trabajo el bombeo debe ser menor al que se presenta para el año 2006 (17 260.27 m³/d), ya que con los años se ha ido incrementando la extracción en el valle y no de manera contraria. Dicho lo anterior, se tomó la información de bombeo de IGF¹², del cual para el presente trabajo se interpretó que el volumen que se tiene reportado únicamente representa una porción de 10 horas al día que es el tiempo que un pozo de cultivo trabaja y no de 24 horas al día. Por lo tanto, se obtuvo una extracción de 13 984.44 m³/d para el año de 1986.

De acuerdo con los estudios realizados durante 2006, se estima una extracción por bombeo es de 17 260.27 m³/d, de los cuales 16 712.32 m³/d corresponden al Valle de SJBL y 547.94 m³/d a la zona de San Bruno. El agua de bombeo se utiliza principalmente para el abastecimiento de agua potable a la localidad de Loreto y para actividad agrícola.

Salidas subterráneas (Sh)

En el informe de 2015 de Conagua¹³ se reporta que para el año 2006 en la desembocadura de San Bruno las descargas subterráneas son hacia el mar, mientras que en el valle se consideró que no hay salida por flujo subterráneo. Cabe mencionar que las salidas hacia el mar para este año se ven comprometidas por una intrusión salina producto de la sobreexplotación. En el informe de 2015 de Conagua¹⁴

¹²Instituto de Geofísica. 1986. Estudio Geohidrológico-Geofísico en la cuenca de San Juan Bautista Londó, Municipio Comondú, Reporte para SARH, México: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, México.

¹³Comisión Nacional del Agua. 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero San Juan B. Londó (0329), Estado de Baja California Sur. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos. México CDMX, 26 pp. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/102843/DR_0329.pdf.

¹⁴Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero San Juan B. Londó (0329), Estado de Baja California Sur, Comisión Nacional del Agua, 2015, Subdirección General Técnica,

se determinaron las salidas subterráneas de San Bruno a partir del despeje de la Ecuación de balance (Ecuación 3.5), sin embargo para el presente estudio se usará el valor de la recarga vertical R_v (antes calculada) para despejar el valor de Sh , tal y como se muestra a continuación:

$$Eh + Rv = Sh + B \quad (3.12)$$

donde, despejando:

$$Sh = Eh + Rv - B$$

$$Sh = 3308.45 + 1942.73 - 547.94$$

$$Sh = 4703.24$$

Por lo tanto el valor de Sh es de 4703.24 m³/d.

Por otro lado, las salidas subterráneas para el año 1986 fueron calculadas anteriormente en la sección “Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)”, y son de la magnitud de 4843.77 m³/d.

Balance

Con base en la asignación previa de valores se obtuvo el siguiente valor de cambio de almacenamiento en la Ecuación de balance para cada año (Tabla 3.10).

Tabla 3.10: Resumen del balance de aguas subterráneas del Valle de SJBL y de San Bruno para el año 1986 y 2006.

	1986	2006
Entradas	m ³ /d	m ³ /d
Rv	4794.23	4795.10
Fh	8558.77	13 035.94
R Total	13 353	17 831.04
Salidas		
Bombeo	13 984.44	17 260.27
Salidas Sub	4843.77	4703.24
D Total	18 828.21	21 963.51
Cambio de Almace.	-5475.21	-4132.47

En las Figuras 3.14 y 3.15 se resume el balance hidrogeológico del Acuífero de SJBL para el año de 1986 y para el año de 2006. Entre ambos balances se puede distinguir grandes diferencias en sus volúmenes y en su dinámica de flujo. En primer lugar, los volúmenes de extracción aumentaron de 1986 a 2006. Además, la extracción se acelera en la desembocadura de San Bruno, lo que provocó que para el año 2006 la descarga hacia el mar se viera comprometida, ya que se originó una intrusión salina. Dicha intrusión salina aportó un volumen de entrada al acuífero libre en contraste con el año 1986. Así mismo, se entiende que la entrada por flujo horizontal o subterránea aumentara del año 1986 a 2006, debido al aumento en la extracción lo que hace que el gradiente hidráulico aumente y por consiguiente aumente el volumen de ingreso al acuífero.

Cabe destacar que para el año 2006 en el sur del acuífero se señala una descarga subterránea originada por la batería de pozos instalada para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Loreto. Dicha descarga no fue posible conocerla por falta de información de los caudales en la batería de pozos, sin embargo se consideró conveniente agregarla en el resumen. El volumen de entrada subterránea para la capa 4 (acuífero fracturado) fue estimado como el 10% de la recarga vertical. Por último, es importante mencionar que los volúmenes de descarga hacia el mar en la capa 3 y 4 fueron inferidos, sin embargo, se ajustarán estos valores durante la calibración del modelo numérico.

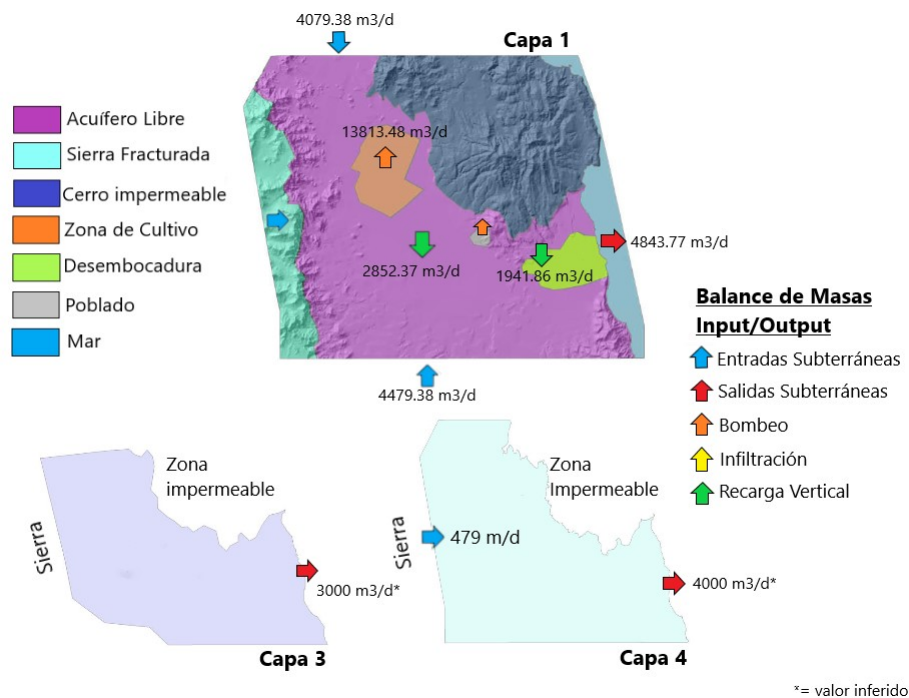


Figura 3.14: Resumen de Balance del Acuífero de SJBL para el año 1986.

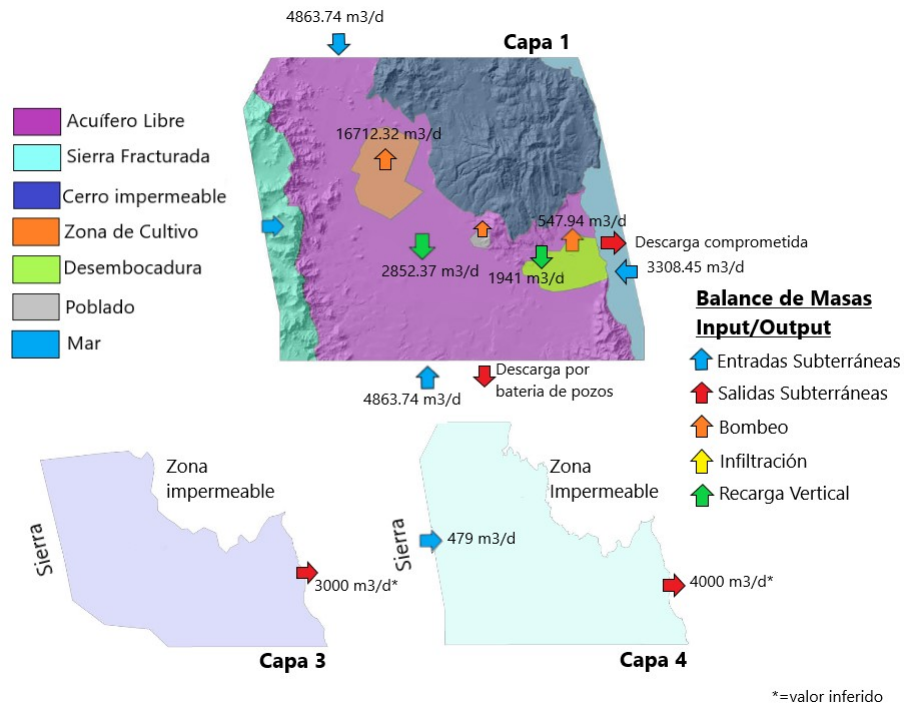


Figura 3.15: Resumen de Balance del Acuífero de SJBL para el año 2006.

3.9. Supuestos básicos del modelo conceptual

La zona de estudio forma parte de un valle tectónico dentro del Acuífero administrativo de SJBL, con mínimas porciones en los Acuíferos de Loreto, La Purísima y Rosarito. La principal fuente para la extracción de agua en el Acuífero de SJBL es el material granular en el Valle de SJBL. Las principales recargas provienen de las sierras del norte y del sur por medio del flujo subterráneo. Tal como se muestra en la Figura (3.16), al poniente se encuentra la Sierra La Giganta, de la cual se logra una recarga por medio de fallas y fracturas. Al NE se encuentra el Complejo Volcánico Mencionares que inhabilita la infiltración de agua. Al SE se encuentra un parteaguas que desconecta hidráulicamente al valle con la desembocadura de San Bruno. En esta última zona se encuentra un acuífero granular con intrusión salina. Se clasifica hidrogeoquímicamente al Valle de SJBL en 3 zonas. Al norte, se tienen concentraciones de STD medias. Al sur del valle se reportaron concentraciones bajas en STD. Para la zona de la desembocadura de San Bruno se registraron altas concentraciones en STD. Al SE del Cerro Mencionares se encuentra una zona denominada Agua Caliente por la presencia de agua termal. Es en esta misma zona que se reporta que el agua subterránea proviene de un sistema regional de flujo subterráneo, posiblemente transportada a través de un sistema de fallas. Por otro lado, el agua subterránea en el valle tiende a ser de un flujo local, con algunas excepciones de tener tendencia intermedia, esto debido a

la sobreexplotación de agua en el subsuelo. El diagrama de Piper indica que el agua es de tipo clorurada y/o sulfatada sódica, asociada con agua de mar, salmueras y/o sedimentaria y a una mayor evolución y permanencia en el subsuelo. Los niveles estáticos del agua en el Valle de SJBL se encuentran entre 20 y 30 m y en San Bruno entre 5 y 10 m. De 1986 a 2006 se observa un abatimiento promedio de 2 m en Sta. Rosa y de 5 m en SJBL. El Acuífero de SJBL está comprendido por 3 unidades con saturación de agua (Figura 3.16). La unidad más somera es el acuífero libre con 200 m de espesor y hasta 300 m en algunas partes, del cual se extrae el agua para la región. Le subyace una capa arcillosa confinante que se presenta de manera irregular en el valle. A la capa confinante le subyace una unidad de areniscas y conglomerados semiconsolidados de la Frm. Salada de permeabilidad media. Finalmente, subyace un acuífero fracturado perteneciente a la Frm. Comondú. Al realizar el balance de agua subterránea resultó una recarga total anual de 4.7 hm^3 para el Valle de SJBL y de 2 hm^3 para la desembocadura de San Bruno, con un total de recarga para ambas zonas de $6.5 \text{ hm}^3/\text{año}$. Por otro lado, se tiene que las descargas son de $-1.3 \text{ hm}^3/\text{año}$ en el Valle de SJBL y de $-0.79 \text{ hm}^3/\text{año}$ en San Bruno, lo que representa una descarga total de $-2.3 \text{ hm}^3/\text{año}$. Finalmente, el cambio de almacenamiento total resultó de -2.34 hm^3 anuales.

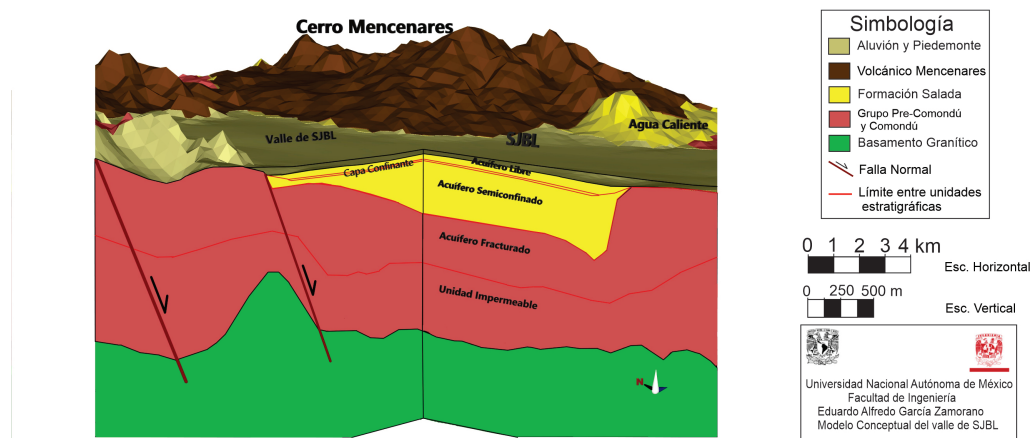


Figura 3.16: Modelo Conceptual del Valle de SJBL.

3.10. Modelo Matemático

En la Sección 3.8.1. se describió la Ley de Darcy, en la cual gran parte del modelo matemático estará basado. Para poder implementar dicha ley en el modelo vamos a expresar la Ley de Darcy (Ecuación 3.8) en términos diferenciales, considerando el gradiente hidráulico $\frac{h_1-h_2}{L}$ en forma diferencial $\frac{dh}{dL}$ y dividimos ambos lados de la Ecuación 3.8 entre A para obtener $q = \frac{Q}{A}$, con esto último se tiene la siguiente Ecuación:

$$q = -k \frac{dh}{dL} \quad (3.13)$$

Donde q es la variable que representa el flujo volumétrico por unidad de área y el signo negativo indica que el flujo va en dirección al decremento de la carga hidráulica.

Para representar el flujo en tres dimensiones es necesario adaptar la Ecuación 3.13 a un entorno tridimensional. Con lo que llegamos a la Ley de Darcy para un acuífero isotrópico (Ecuación 3.14), es decir que está descrita para las tres componentes espaciales (x, y, z) y que la magnitud del parámetro k es la misma en las 3 direcciones. Además, la Ecuación 3.14 requiere el uso de derivadas parciales, ya que la Ecuación está expresada en función de las tres componentes.

$$q_x = -k \frac{\partial h}{\partial x} \quad q_y = -k \frac{\partial h}{\partial y} \quad q_z = -k \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3.14)$$

El signo negativo indica que el flujo va en la dirección contraria al gradiente hidráulico, es decir, de mayor a menor carga hidráulica. Si bien, la Ecuación 3.14 describe un medio isotrópico donde k es constante en las 3 direcciones, se puede describir un medio en donde k no sea el mismo valor para x, y y z , es decir un medio anisotrópico (Doménico et al., 1998). Se presenta entonces la siguiente Ecuación:

$$q_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad q_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad q_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3.15)$$

3.10.1. Ecuación de continuidad en estado estacionario

La Ecuación de continuidad expresa el principio de conservación de la masa, para explicarla se simplifica el análisis tomando en cuenta una porción cúbica del acuífero o un volumen de control (Figura 3.17), en donde el volumen de flujo que entra debe ser igual al volumen del mismo fluido que sale (Wang, 1982; Domenico et al., 1998; Ingebristen et al., 2006). Para la Ecuación de continuidad no existen fuentes ni sumideros.

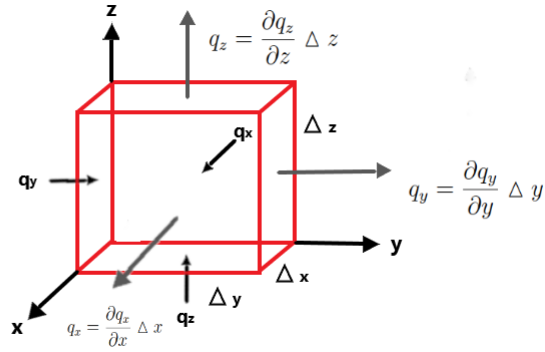


Figura 3.17: Balance de flujo en un volumen de control.

El flujo se someterá a la variación en cada una de las componentes (x , y y z) del volumen de control $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$. De tal manera que se expresen los cambios del flujo (q) en cada una de las componentes. El flujo que ingresa al volumen por la cara de la componente x interactúa con el medio, antes de su salida por la otra cara de la misma componente.

La geometría del volumen de control en la Ecuación de continuidad está representada como el producto de $\Delta x \Delta y \Delta z$. El paso del flujo por el volumen se expresa como el producto de la derivada del flujo por el área transversal a las tres direcciones (x , y , z). Dicha área en el caso de la componente q_x está representada en la Ecuación 3.16 como el producto $\Delta y \Delta z$, así pues, el cambio neto en la salida para el caso de la componente x sería (Wang, 1982):

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta x\right)(\Delta y \Delta z) = \frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta V \quad (3.16)$$

Para las componentes y y z sucede lo mismo:

$$\text{Para } y : \frac{\partial q_y}{\partial y} \Delta V \quad (3.17)$$

$$\text{Para } z : \frac{\partial q_z}{\partial z} \Delta V \quad (3.18)$$

De tal manera, que la suma de las tres componentes sea igual a cero, puesto que no hay fuentes ni sumideros. Para eso se divide ambos lados de las Ecuaciones (3.16, 3.17 y 3.18) entre ΔV y se suman entre sí para obtener la siguiente Ecuación:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad (3.19)$$

3.10.2. Ecuación general del flujo subterráneo en estado estacionario

Existen dos formas de describir el flujo subterráneo, la Ecuación de Laplace y la Ecuación de Poisson. La Ecuación de Laplace describe el flujo del agua subterránea para condiciones estacionarias sin fuentes ni sumideros. A diferencia, la Ecuación de Poisson sí involucra fuentes y sumideros.

La Ecuación de Laplace combina la Ecuación de Darcy y la de continuidad en una Ecuación de derivadas parciales de segundo orden (Wang, 1982). Sustituye la velocidad de Darcy en cada componente vectorial en la Ecuación de continuidad (Ecuación 3.19) como se observa a continuación:

$$\begin{aligned} q_x &= -k_x \frac{\partial q_x}{\partial x} \\ q_y &= -k_y \frac{\partial q_y}{\partial y} \\ q_z &= -k_z \frac{\partial q_z}{\partial z} \end{aligned} \tag{3.20}$$

Sustituyendo a la Ecuación 3.20 en la Ecuación 3.19.

$$\frac{\partial(-K_x \frac{\partial h}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(-K_y \frac{\partial h}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial(-K_z \frac{\partial h}{\partial z})}{\partial z} = 0 \tag{3.21}$$

Si se considera la k (conductividad hidráulica) como constante para las tres componentes, entonces es posible extraerla de la derivación y despejarla al otro lado de la Ecuación de la siguiente manera:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \tag{3.22}$$

Por otro lado, la Ecuación de Poisson establece un espesor definido para b en un área horizontal igual a $\Delta x \Delta y$, lo cual es posible para un volumen representativo. Considerando dichos criterios se puede establecer una Ecuación que integre los factores de extracción y recarga. De tal manera, la recarga se define como $R(x,y)$ y representa el volumen agregado por unidad de tiempo en el sistema. La Ecuación en estado estacionario es como sigue:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta x (b \Delta y \Delta z) + \frac{\partial q_y}{\partial y} \Delta y (b \Delta x \Delta z) + \frac{\partial q_z}{\partial z} \Delta z (b \Delta x \Delta y) = R(x, y, z) \Delta x \Delta y \Delta z. \tag{3.23}$$

Finalmente sustituimos la Ecuación 3.20 en la Ecuación 3.23, representamos la conductividad hidráulica en términos de la transmisividad definida como el producto de la conductividad hidráulica y el espesor (b), se divide la Ecuación entre $-T\Delta x \Delta y \Delta z$ y obtenemos la Ecuación de Poisson:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = -\frac{R(x, y, z)}{T} \quad (3.24)$$

3.10.3. Ecuación de flujo en estado transitorio

Para la Ecuación en estado transitorio se consideran los cambios en el tiempo de q . Así mismo se considera un volumen de salida y de entrada simulando las recargas y descargas del sistema. Un parámetro importante a tomar en cuenta para el estado transitorio es el coeficiente de almacenamiento específico, definido como el volumen de agua que es almacenado o cedido al presentarse un cambio unitario en el material que la contiene. Este parámetro determinará en la Ecuación de flujo subterráneo el volumen de agua cedido por el acuífero y permitirá aproximar el flujo transitorio (Wang, 1982).

$$S = \frac{\Delta V_w}{\Delta x \Delta y \Delta z \Delta h} \quad (3.25)$$

Cuando el agua es cedida por el material, se utiliza el signo negativo en la carga (denominador) y positivo en el volumen (numerador). De tal manera que cuando el agua es agregada al sistema se emplea signo positivo en la carga y signo negativo en el volumen. Una vez definido el coeficiente de almacenamiento específico, la Ecuación de flujo subterráneo en estado transitorio queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta x (b \Delta y \Delta z) + \frac{\partial q_y}{\partial y} \Delta y (b \Delta x \Delta z) + \frac{\partial q_z}{\partial z} \Delta z (b \Delta x \Delta y) \\ & = R(x, y, z, t) \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{S \partial h}{\partial t} (\Delta x \Delta y \Delta z) \end{aligned} \quad (3.26)$$

Se divide la Ecuación 3.26 de ambos lados entre $-T\Delta x \Delta y \Delta z$ según la Ley de Darcy, donde $T=k b$, para obtener la Ecuación general de flujo para el estado transitorio.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{R(x, y, z)}{T} \quad (3.27)$$

Capítulo 4

Modelación matemática y computacional del flujo subterráneo en el Valle de San Juan Bautista Londó

4.1. Documentación

La información utilizada para la construcción del modelo conceptual y numérico proviene de diversas fuentes, tanto documentos públicos, como privados, así como también documentos de investigación y tesis académicas. En esta sección se presentan los diferentes rubros y sus fuentes de información para definir el modelo matemático computacional del acuífero.

4.1.1. Mapa Geológico e información topográfica

- 2 cartas geológicas 1:50 000 del Servicio Geológico Mexicano (SGM); “Loreto” (G12-A88) y “Santa Rosa” (G12-A78).
- 2 archivos ‘.shp’ con información topográfica proporcionado por el SGM.

Se delimitó el área de estudio tomando parte de los mapas del SGM, usando una porción de ambos y después uniendo dichas porciones con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). De la misma manera, se construyó un mapa topográfico del área de estudio con archivos ‘.shp’ que se pueden descargar de la página del SGM. Dicho mapa fue procesado para crear un mapa de sombras y un modelo digital de elevación.

Posteriormente, se desarrolló el mapa geológico base, delimitando los contactos geológicos a partir de consultas en los mapas del SGM, utilizando herramientas SIG. Finalmente, se detallaron los contactos litológicos empleando el mapa que presenta Lesser (2006), por medio de las herramientas SIG.

4.1.2. Estratigrafía

Se tomó como información base la clasificación e información estratigráfica que elaboró en 1986 el IGF en conjunto con la SARH¹. En estas fuentes se reporta una profundidad de entre 1600 m a 2200 m, a la que se encuentra el basamento, además de destacar espesores de más de 1000 m para la Formación Salada y espesores cerca de 1000 metros para el Grupo Comondú y Pre-Comondú. Se calibraron los espesores de las unidades estratigráficas que reporta el IGF y el SARH¹ basado en los trabajos mencionados a continuación. La tesis de Rodríguez-Díaz (2009), en la cual se estimaron espesores de diversas formaciones en una región mucho más extensa.

Así mismo, se calibró la estratigrafía del Grupo Comondú apoyándose en el trabajo de Durán-Calderón (2016), el cual detalla por medio de geoquímica y trabajo de campo a dicho grupo. Cabe destacar el proyecto de “Agua Caliente”, donde se midió resistividad y gravimetría, elaborado por “Investigaciones Geofísicas de México” para la Comisión Federal de Electricidad², se realizaron 15 sondeos eléctricos verticales al sureste del Cerro Mancenares. En dicho estudio geofísico de la zona “Agua Caliente” se encontró el contacto entre la Formación Salada y la Formación Comondú aproximadamente a 600 m y decretan un espesor de aproximadamente 120 m para el Complejo Volcánico Mancenares. Más adelante, como parte del mismo proyecto exploratorio la CFE³ perforó el pozo AC-1. Dicho pozo se encuentra ubicado en la zona dentro del área de estudio, denominada por CFE como Agua Caliente, tiene una profundidad de 500 metros y corta superficialmente a la Formación Salada (siendo ésta la única unidad que atraviesa).

Arroyo (2018) con la técnica transitorio electromagnético (TEM) infirió el contacto entre el aluvión y la Formación Salada a una profundidad promedio de entre 100 y 150 m al oeste del valle, cercano a las faldas de la Sierra La Giganta. Así mismo, una capa de material arcilloso a una profundidad de entre 100 m y 200 m con espesores carcanos a los 40 m, también se puede resaltar que el aluvión aumenta su espesor hacia el poniente del valle. Lesser (2006) reporta que el espesor del aluvión aumenta hacia el poniente, cercano a la línea de costa.

4.1.3. Geología Estructural

Para el modelo estructural se realizó de igual manera una revisión bibliográfica, partiendo del modelo tectónico, en donde el valle representa estructuralmente un

¹Instituto de Geofísica. 1986. Estudio Geohidrológico-Geofísico en la cuenca de San Juan Bautista Londó, Municipio Comondú, Reporte para SARH, México: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, México.

²Comisión Federal de Electricidad. 1996. Estudio de resistividad y gravimetría en la zona, BCS, Santiago Papasquiaro, DGO y Agua Caliente, BCS. Contrato CLS-GPG-3002/96.

³Comisión Federal de Electricidad. 1997. Propuesta para la localización de pozos de gradiente en el Centavito, Agua Caliente y Santispec, BCS. Reporte GG-CBI-019/96. Gerencia de Proyectos Geotermoelectricos Subgerencia de Estudios, Departamento de Exploración.

graben con orientación NO delimitado por fallas normales al poniente y al oriente. De acuerdo con el estudio del IGF y la SARH¹, el graben internamente está constituido por un arreglo de pilares y fosas, principalmente 3 terrazas tectónicas. Se consultaron los reportes elaborados por el SGM, de los mapas geológicos-mineros de “Loreto” y de “Santa Rosa”. De aquí se refuerza el concepto de que el valle se divide en pilares y fosas tectónicas. Además, se reportan las fallas presentes en la zona por medio de imágenes satelitales. Se aprecian las principales estructuras geológicas, las cuales se trazaron en el mapa geológico estructural. Dichas fallas son esencialmente de tipo normales, aunque algunas presentan componente lateral. Dentro de las cuales, las más marcadas son las fallas NO que demarcan el valle tectónico o graben. Para estas fallas se consideraron los siguientes desplazamientos: desplazamiento de 300 m para la falla más prominente al extremo poniente de la zona de estudio, en la Sierra La Giganta. Para las demás fallas que limitan el graben (una al poniente y otra al oriente del valle) se consideró un desplazamiento de 100 m.

Para la falla más prominente en la Sierra La Giganta (Figura 4.5 y 4.6) se consideró el desplazamiento mencionado tomando la diferencia altitudinal (apoyándose en el echado de la falla) entre la parte más alta de la Sierra La Giganta y las faldas de la sierra, en donde se encuentran depósitos de Piedemonte. Para las otra fallas que limita el graben al poniente (Figura 4.5 y 4.3) se consideró el desplazamiento de 100 m por la diferencia altitudinal entre el techo de la falla y el valle. Para la falla al oriente del graben (Figura 4.4) se consideró un desplazamiento de 100 m, y por lo tanto, el único bajón altitudinal al este del valle, ya que se considera que el graben es asimétrico.

Otra de las fallas importantes es la Falla Loreto (Figuras 4.1 y 4.4), en la cual se tomó como referencia bibliografía el estudio de Meyer (1999), en donde se estudia la subsidencia de la cuenca Loreto a lo largo del Plioceno y Cuaternario. De este estudio se puede destacar que la falla Loreto termina al NO de la ciudad de Loreto, en la parte centro sur del Valle de SJBL. Además, se reporta que la actividad de la falla Loreto es consecuencia del sistema de fallas con orientación NO de hace 3.5 Ma, contemporáneo a la sedimentación de la Formación Salada. La falla Loreto se consideró con un desplazamiento de alrededor de 300 m. Esto debido al gran espesor de más de 1000 m del material que rellenó la cuenca de Loreto (Formación Salada), reportado por el IGF⁴. Además, se consideró como un límite estructural importante de las fosas antes mencionadas dentro del actual valle, dicho límite estructural funcionó para la sedimentación de la Formación Salada. Con respecto a las otras fallas, estas fueron consultadas en los reportes de los mapas “Loreto” y “Sta. Rosa” del SGM.

⁴Instituto de Geofísica. 1986. Estudio Geohidrológico-Geofísico en la cuenca de San Juan Bautista Londó, Municipio Comondú, Reporte para SARH, México: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, México.

4.1.4. Visualización de fallas estructurales en el modelo

Las siguientes Figuras (4.1-4.6) fueron exportadas de Visual Modflow Flex. El modelo mostrado es una visualización de las zonas correspondientes a las unidades: aluvión, Complejo Mencionares, Grupo Salada, Grupo Comondú y Basamento Granítico. De color beige se puede observar la zona del aluvión, de color amarillo a la zona del grupo Salada, de color marrón al Complejo Volcánico Mencionares, de color rosa al Grupo Comondú y de color verde al Basamento Granítico (la mayoría de las visualizaciones del modelo tienen una exageración vertical de 5x).

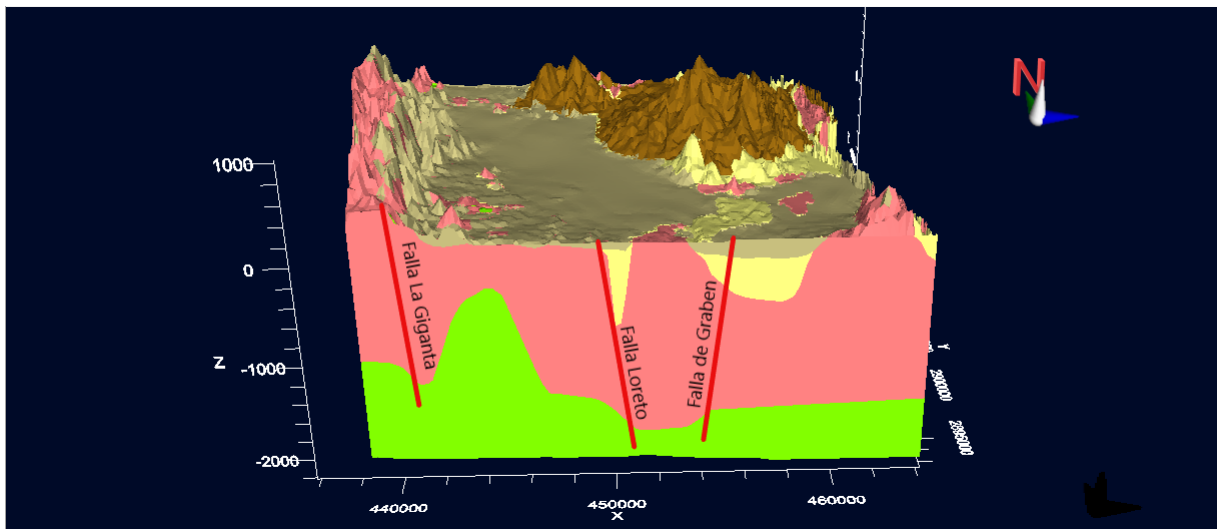


Figura 4.1: Se pueden observar las Fallas de La Giganta, Falla Loreto y la Falla del valle que denota al graben.

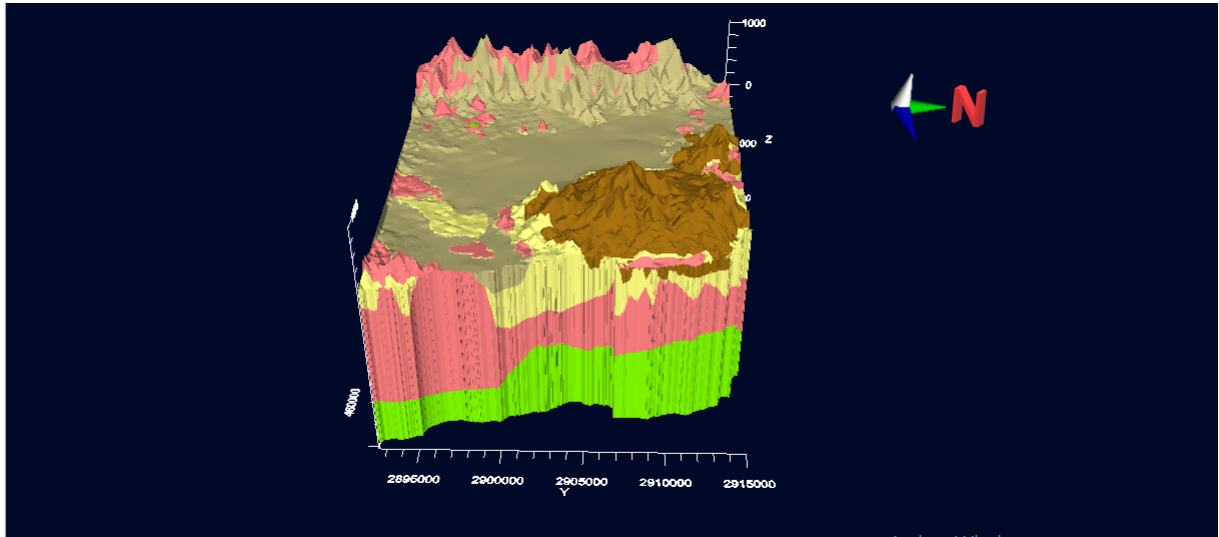


Figura 4.2: Vista de de canto de la línea de costa.

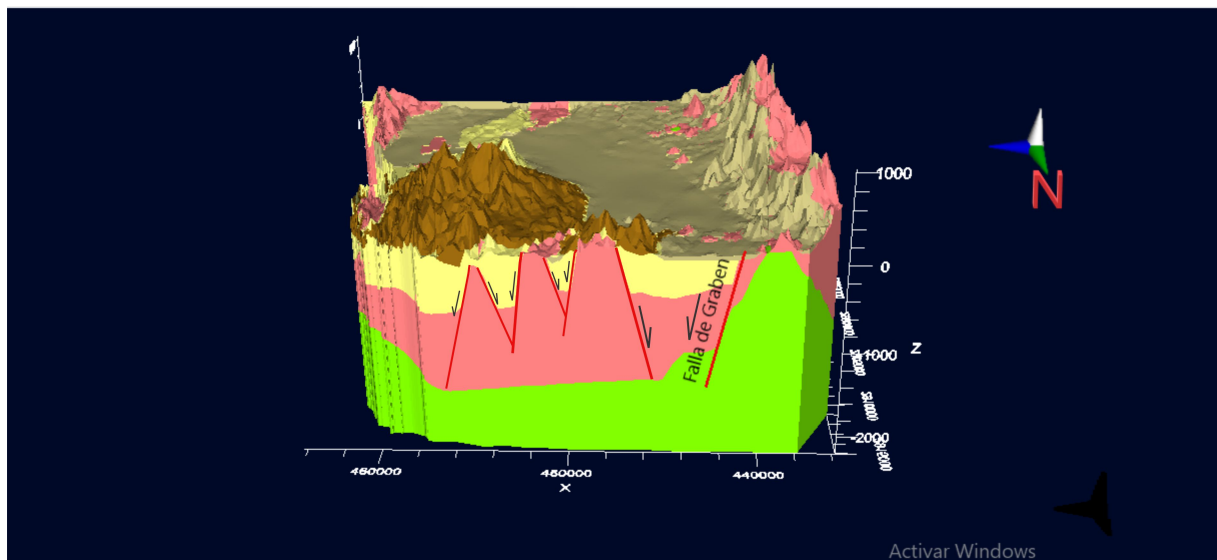


Figura 4.3: Se observa la falla al oeste del valle que limita al graben y las fallas asociadas al origen del Complejo Volcánico Mancenares.

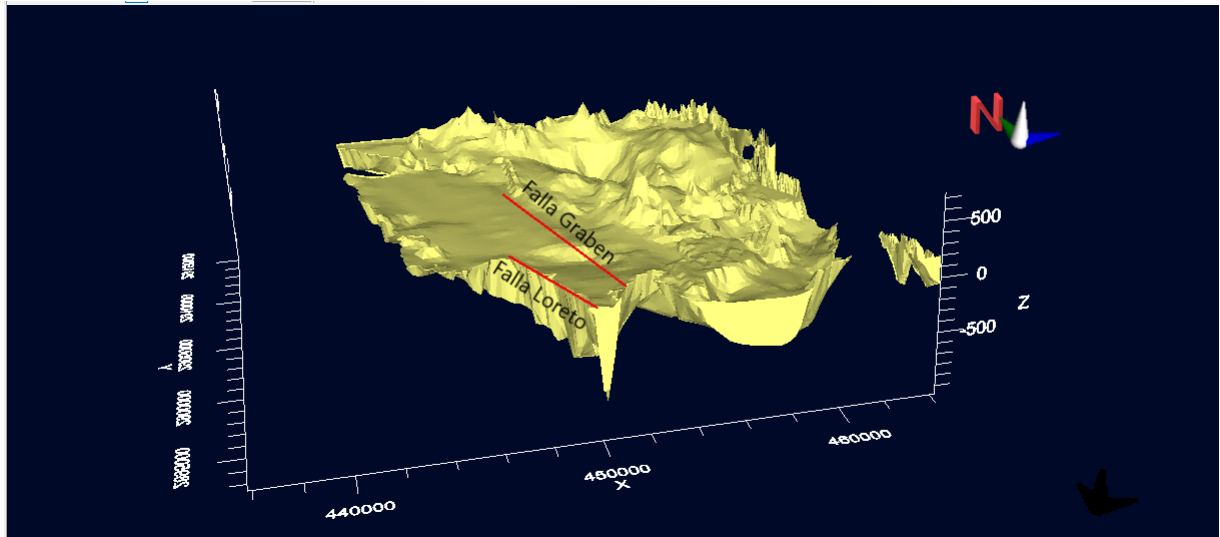


Figura 4.4: Se observa el Grupo Salada de forma aislada y las fallas de Loreto y la falla oriental del graben.

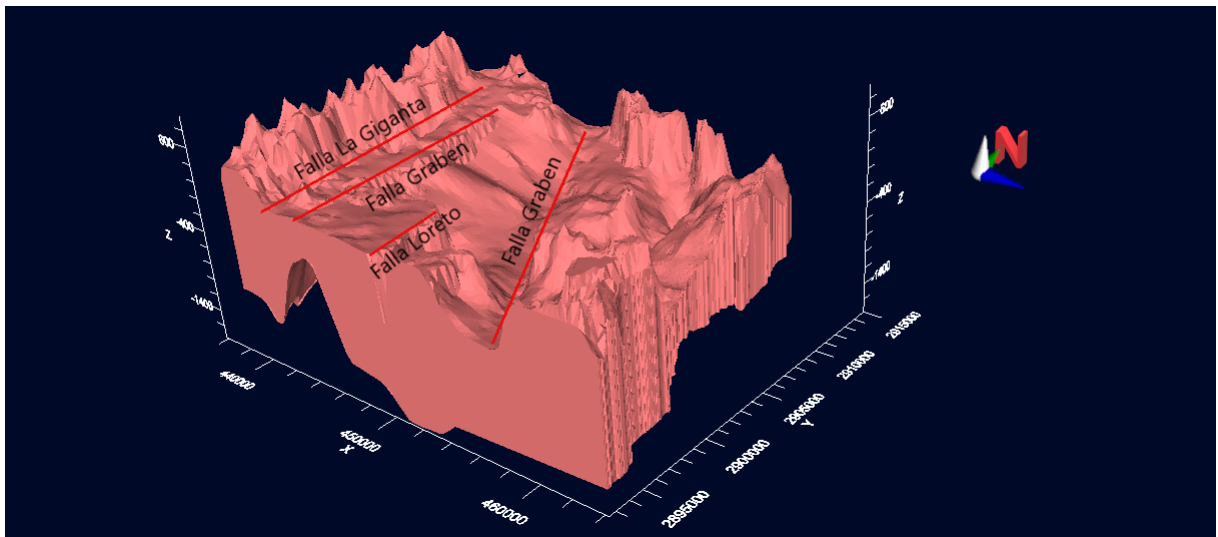


Figura 4.5: Se observa únicamente al Grupo Comondú y a las fallas que cortan a las secuencias y basamento profundo.

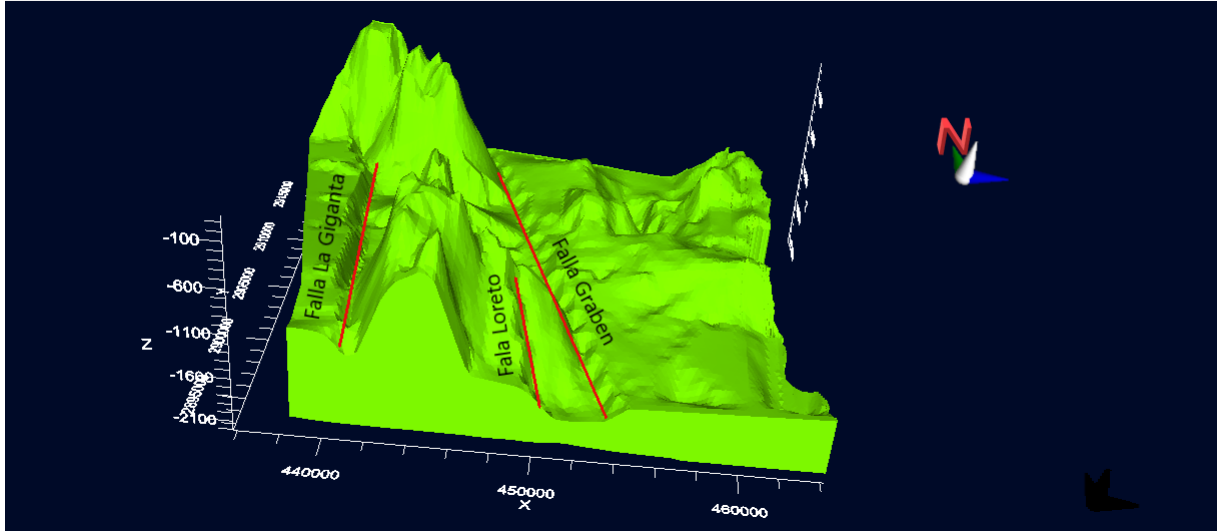


Figura 4.6: Se observa la zona del Basamento cortada por las fallas más importantes del graben.

4.2. Construcción del Modelo Conceptual en tres dimensiones (3D)

Para el desarrollo del modelo conceptual se emplearon herramientas de información geográfica, el software “Move” (Versión 2017.2), entre otras herramientas digitales. Se trabajó a partir de la información recabada en la revisión bibliográfica, tomando en cuenta la calibración de espesores y profundidades descritos en la sección anterior, los desplazamientos estimados y los datos de rumbo y echado de las fallas.

Como primer paso, se importó el Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés) a “Move”. El software procesó el DEM y permite visualizarlo en su interfaz de la forma en que se observa en la Figura (4.7).

Se convirtió la superficie DEM de grid a una superficie mesh (Convert-Convert Grid to Mesh). De igual forma, se importó el mapa geológico y las fallas en formato Shape ‘.shp’ y el mapa geológico se convirtió de polígonos a polilíneas (*Convert-Convert to Ployline*), de tal manera que los contactos entre unidades litológicas fueran polilíneas.

Posteriormente, se proyectaron las polilíneas de los contactos litológicos y de las fallas en la superficie mesh del DEM (*Model Building-Project-To Surface*) (Figura 4.7).

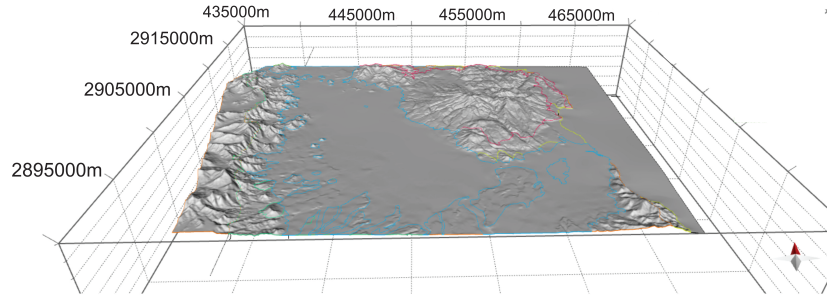


Figura 4.7: Se muestra el Modelo Digital de Elevación junto con los contactos de las litologías proyectadas al DEM.

Con la función de *Section* en *Create Section*, se realizaron 8 secciones guía (Figura 4.8) tomando como referencia los contactos o polilíneas proyectadas de las formaciones geológicas.

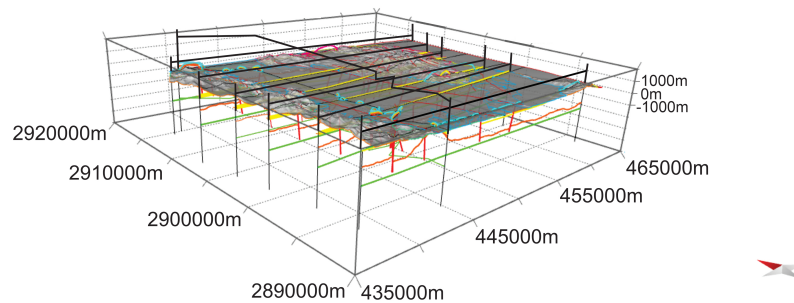


Figura 4.8: Secciones guía que se identifican con líneas negras proyectadas por arriba del DEM.

Como ya se mencionó, las secciones sirvieron como guía para realizar superficies 'mesh' que construyen la base de cada una de las unidades litológicas, así como también los planos de falla (Figura 4.9 y 4.10). Sin embargo, fue necesario implementar polilíneas de apoyo para trazar las superficies mesh que representan la base de cada unidad. Esto último fue de gran apoyo, ya que no era posible construir las superficies mesh únicamente con las polilíneas de las secciones. Este proceso fue meticuloso, con el propósito de mantener los espesores reportados para cada unidad litológica y desplazamientos de las fallas establecidas.

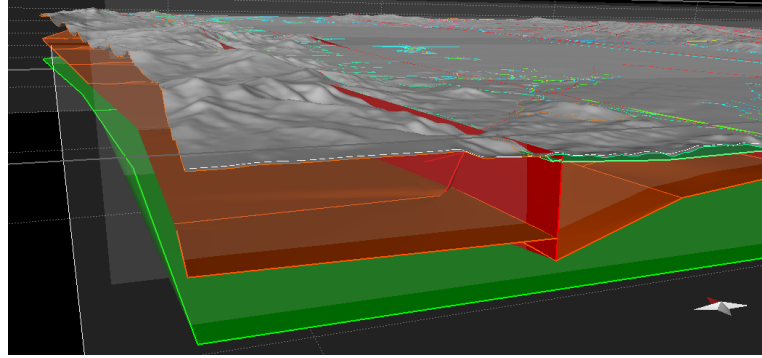


Figura 4.9: Demostración de la creación de las bases de las capas y los planos de falla en rojo.

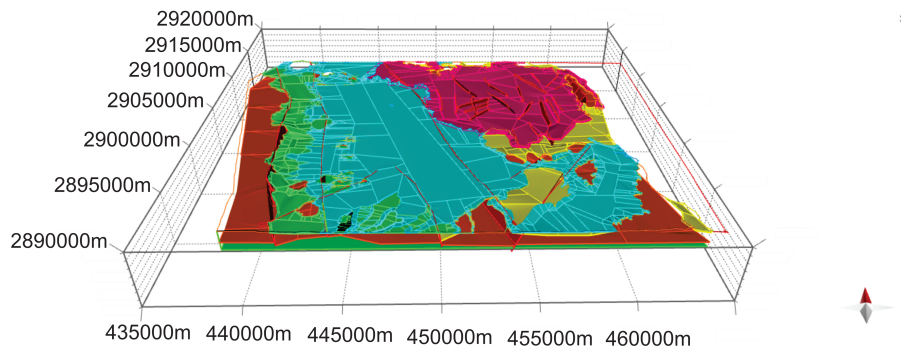


Figura 4.10: Construcción del modelo conceptual. Se muestran las bases de cada una de las unidades litológicas: En azul se observa la unidad de aluvión, en verde la unidad de Piedemonte, la amarilla la Formación Salada, la morada el Complejo Volcánico Mencenares, la café el Grupo Pre-Comondú y la verde oscuro el basamento.

En la Figura (4.10) se pueden observar las superficies que representan las bases de cada una de las formaciones geológicas, se puede apreciar como se acuñan entre sí dejando ver la base de la Formación que aflora a superficie. Por ejemplo, la superficie del Piedemonte (en color verde) se acuña al oeste con la sierra, por eso permite que la superficie del Grupo Comondú sea visible, aún cuando se encuentra a una mayor profundidad.

Como una forma de simplificar el modelo, se decidió tomar en cuenta a la unidad de Aluvión y la unidad de Piedemonte y Abanicos Aluviales como una sola unidad (Figura 4.11). Posteriormente, se exportaron con *Export-As File Type* las superficies de cada unidad, cada una en un archivo con formato ‘.ascii’ (Figura 4.12).

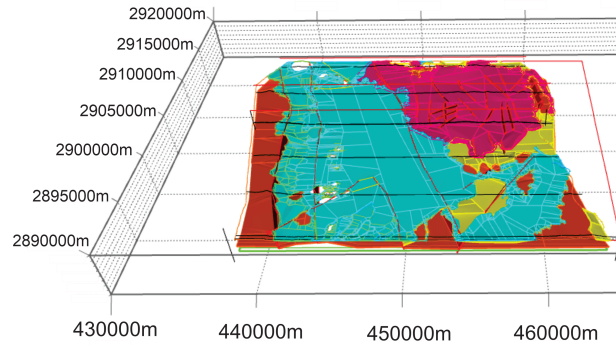


Figura 4.11: Unión de la unidad Aluvión y Piedemonte y Abanicos Aluviales para simplificar el modelo.

Desde el software “Move” se exportaron las superficies de cada capa litológica en formato ‘.ascii’ (Figura 4.12).

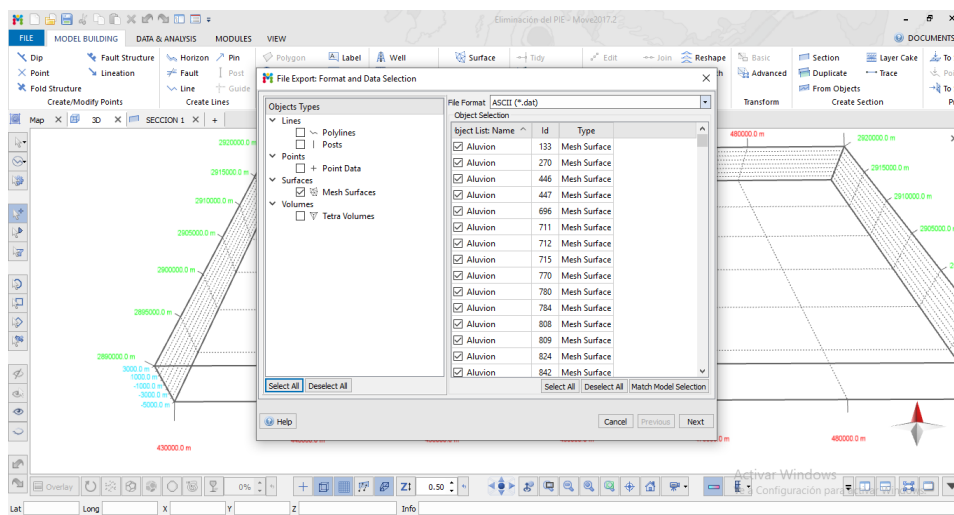


Figura 4.12: Exportación de superficies.

Los archivos de tipo ‘.ascii’, correspondientes a cada una de las unidades, se abrieron en Excel con el fin de darle un formato a los datos y exportarlos como un archivos tipo ‘.csv’.

Para la definición y solución del modelo de flujo se utilizó el software “Visual MODFLOW Flex”. Se implementó este software con el fin de darle un mayor detalle a los límites entre unidades hidroestratigráficas, de tal manera que se pudieran distinguir los horizontes concordantes, discontinuos y erosivos. Esta metodología ayudó a obtener mejores resultados del modelo hidrogeológico, ya que tiene un mayor detalle de las unidades hidroestratigráficas.

Visual MODFLOW Flex parte de un principio el cual distingue los tipos de horizontes para lograr horizontes que se acuñan o truncan en un modelo. El software asigna a cada uno de las superficies que comprenden el modelo una clasificación en los diferentes tipos de horizontes que el mismo software define (Figura 4.13). Con base en esto, se define la relación que tienen entre sí. Este paso es importante porque de ello dependerá el resultado de la creación de las unidades del modelo. A continuación, una breve descripción de los tipos de horizontes (Figura 4.13):

Horizontes erosivos (Erosional Horizons): Puede ser usado como el horizonte más somero, pero no como la base del modelo conceptual. Este tipo de horizonte trunca todos los horizontes que se encuentran por debajo, incluyendo al horizonte base.

Horizontes base (Base Horizons): Puede ser usado como el horizonte base del modelo conceptual. Cualquier tipo de horizonte concordante se acuña sobre este, mientras que los horizontes erosivos o discontinuos lo truncan.

Horizontes de discontinuidad (Discontinuity horizons): Representa una superficie erosiva en medio de una columna de horizontes. No puede ser el horizonte más somero o el más profundo. Los horizontes por arriba de este hasta la siguiente discontinuidad u horizonte erosivo lo traslapan mientras que los horizontes por debajo de este son truncados por él. Estos horizontes pueden ser considerados como la cima o la base de una secuencia.

Horizontes concordantes (Conformable Horizons): Estos horizontes son truncados por horizontes de tipo erosivos, base y de discontinuidad. Horizontes concordantes más profundos son truncados por horizontes concordantes más someros. Si un horizonte concordante está por encima de un horizonte erosivo, el horizonte concordante da forma al horizonte erosivo.

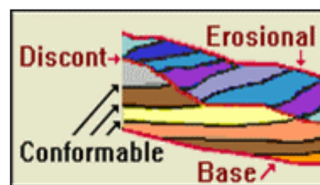


Figura 4.13: Clasificación de los diferentes tipos de horizontes de acuerdo con Visual MODFLOW Flex. (Tomado del tutorial del Visual Modflow Flex).

Partiendo de este principio de horizontes, en la herramienta SIG se importaron cada uno de los archivos ‘.csv’, con la opción “Capa >> Añadir capa de texto delimitado por comas”. En seguida se guardaron cada uno de los archivos importados con formato ‘.shp’. Ahí mismo se modificaron las superficies, de forma que se cortaran entre ellas para definir los volúmenes correctos de cada unidad. Esto se realizó desde la red de puntos de los archivos ‘.shp’ (Figura 4.14) de cada una de las superficies. Se agregaron puntos con valores constantes en el eje z en las áreas donde la superficie se trunca o se acuña (Figura 4.14). Este paso es necesario, ya que Visual MODFLOW Flex crea las unidades o zonas basándose en la forma en

que se cortan las superficies y en el tipo de horizonte que se le haya asignado a cada superficie. Al terminar la configuración de los archivos '.shp', de nueva forma se exporta cada uno de los archivos en formato '.csv', para importarlos en Visual MODFLOW Flex.

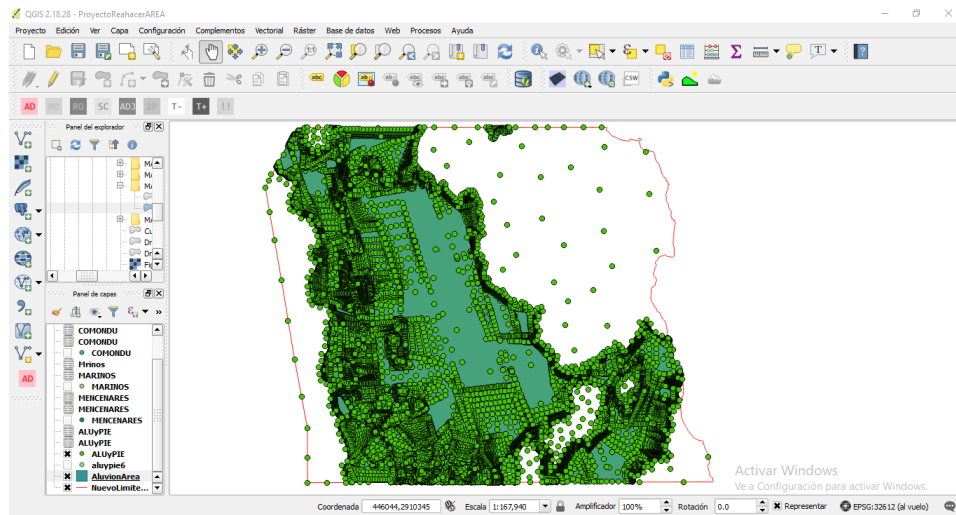


Figura 4.14: Red de puntos de la unidad Aluvi3n. La lnea roja representa el lmite del 1rea de estudio, el fondo color verde denota las 1reas de extensi3n del aluvi3n. El fondo blanco representa las 1reas donde el aluvi3n trunca o se acu1a, que son las 1reas donde se agregaron los puntos adicionales con valores constantes en el eje z.

El siguiente paso es abrir Visual MODFLOW Flex. Al inicio se debe seleccionar el bot3n de la barra principal "FileNew Project" (Figura 4.15).



Figura 4.15: Abrir un nuevo proyecto.

Se abrirá una ventana “Create Project”, en donde se le debe poner nombre al proyecto, asignarle una ruta para guardarlo, elegir el sistema de coordenadas, el DATUM y las unidades predeterminadas de los parámetros (Figura 4.16).

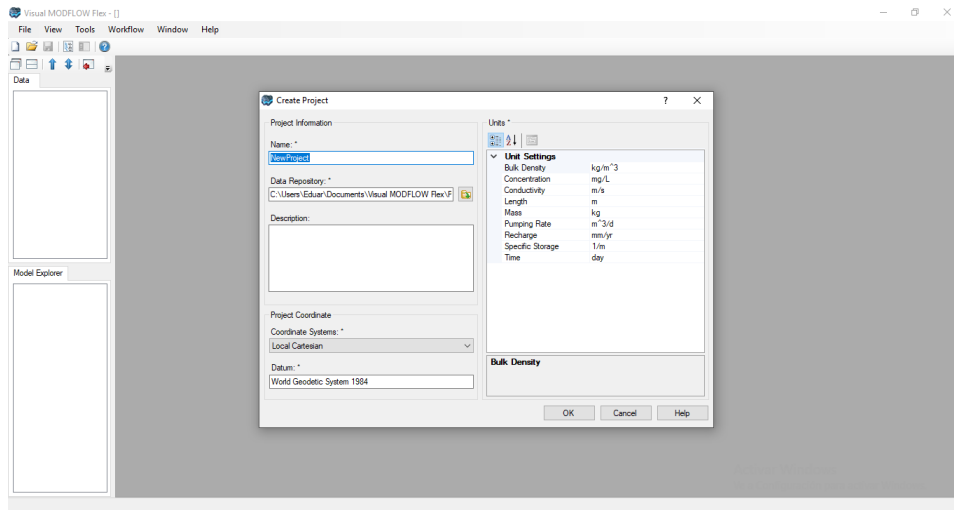


Figura 4.16: Creación de nuevo proyecto.

En seguida, se selecciona la opción “Conceptual Model” (Figura 4.17). Entonces, se abrirá una pestaña llamada “Conceptual Model”, en donde se puede observar que hay diversos pasos a seguir (Figura 4.18). En el primero “Define Modeling Objectives”, se define el tipo de flujo, el tipo de simulación, los motores disponibles para que corra el modelo, la fecha de inicio de la simulación, la magnitud de los valores para los parámetros (conductividad y almacenamiento), además de poder activar transporte en el modelo.

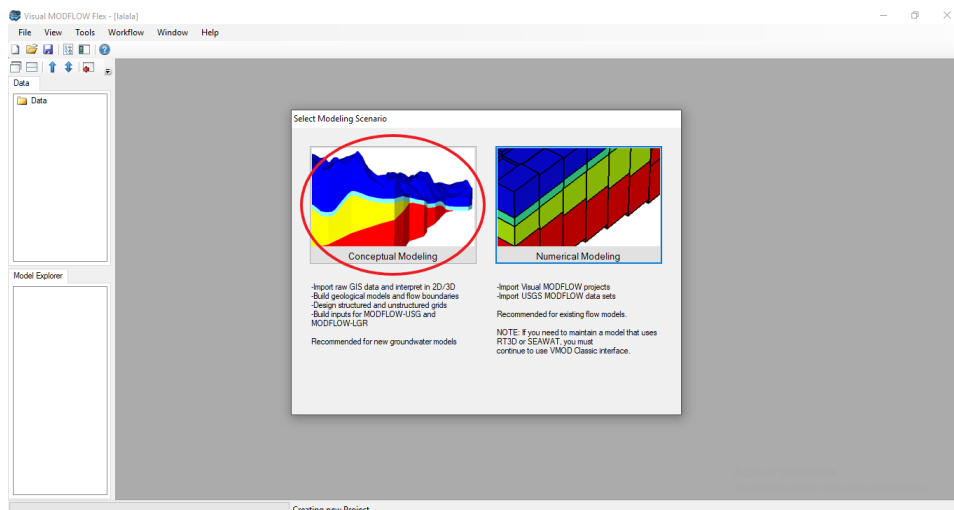


Figura 4.17: Iniciar creación del modelo.

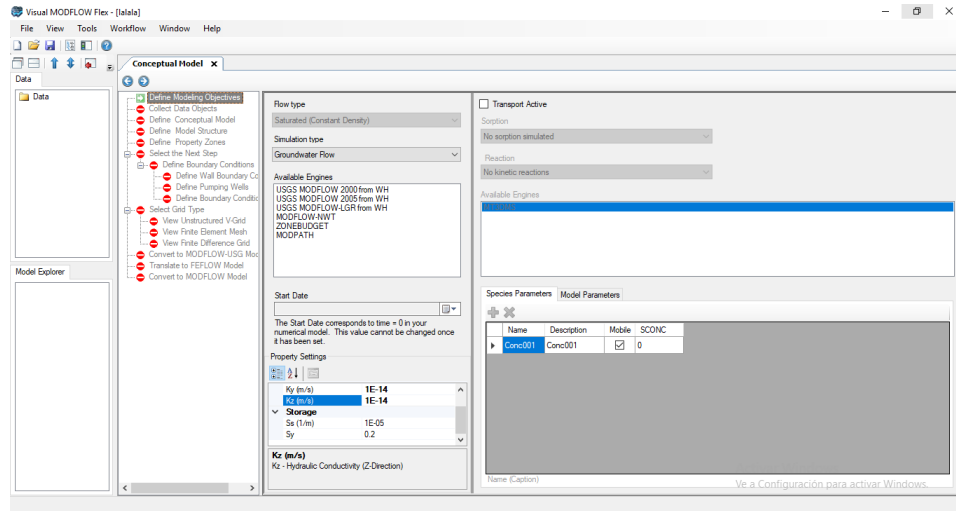


Figura 4.18: Primer paso de la creación del modelo.

En el siguiente paso “Collect Data Objects” se importan (‘Import Data’) cada uno de los archivos formato ‘.csv’ para la creación del modelo conceptual (Figura 4.19).

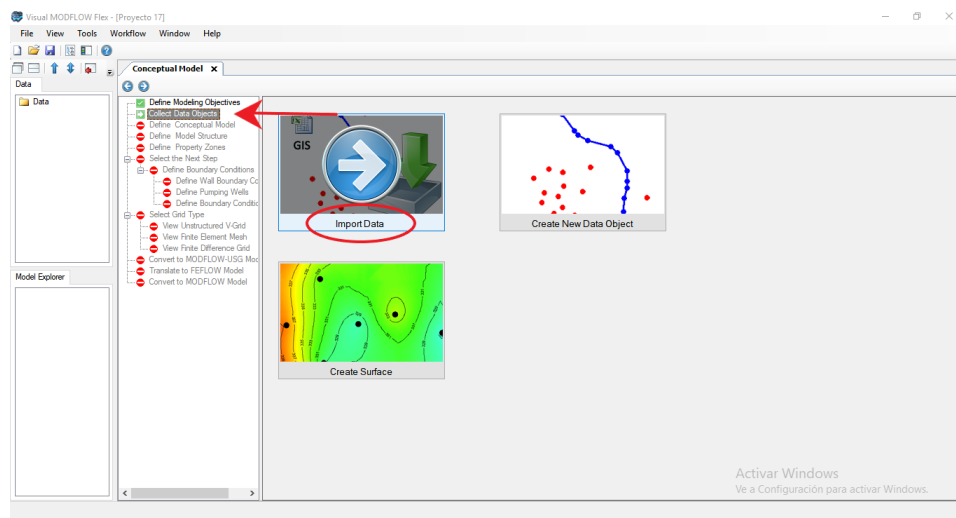


Figura 4.19: Importación de los archivos por medio de la opción “Import Data”.

En primer lugar, se importó el archivo de la topografía en formato ‘.ascii’ (Figura 4.20), seleccionando la opción ‘Superficie’ en el menú emergente.

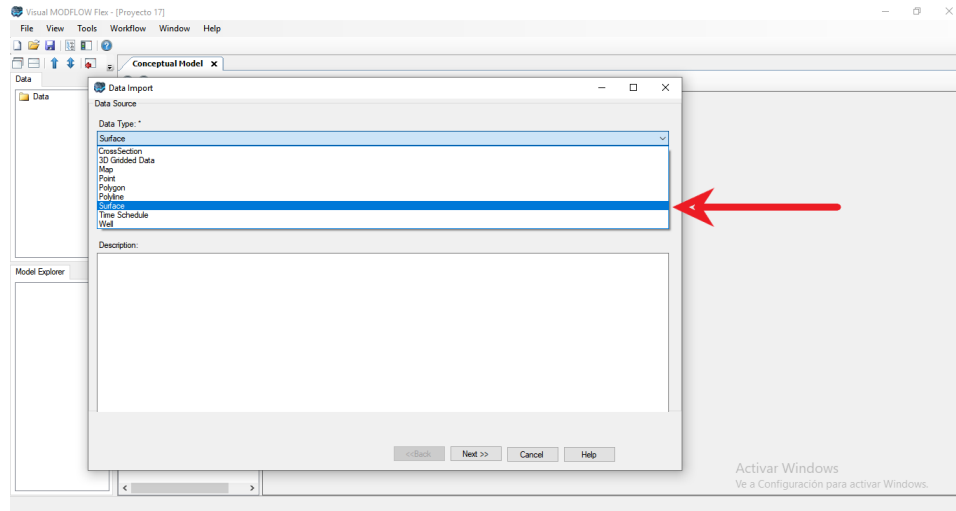


Figura 4.20: Importación de la superficie topográfica.

Se importó el polígono que delimita el área del modelo. El tipo de archivo que se seleccionó como “Polygone” del menú (Figura 4.21).

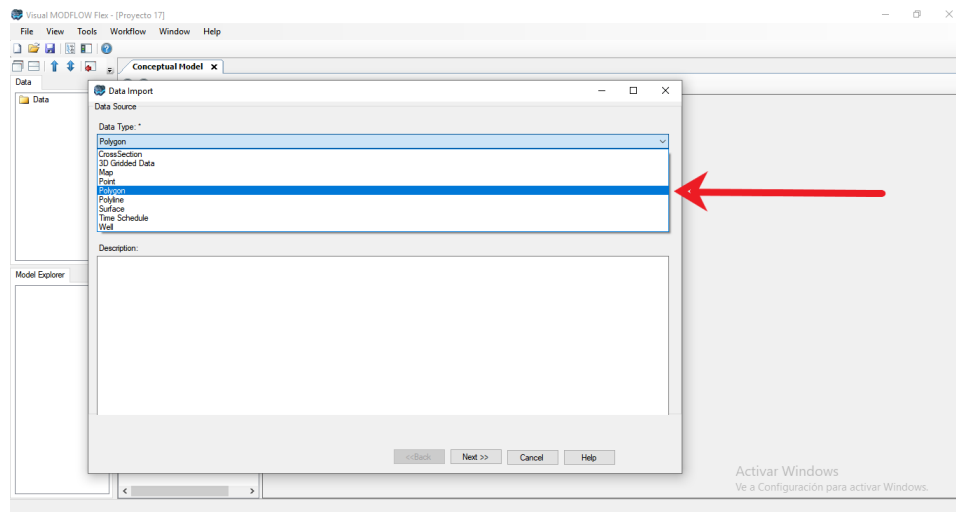


Figura 4.21: Importación de un polígono.

Así mismo, se importaron los archivos de punto con formato ‘.csv’, los cuales se exportaron de la herramienta SIG y que representan las superficies de cada una de las unidades hidroestratigráficas, usando la opción de tipo de archivo “Point” (Figura 4.22).

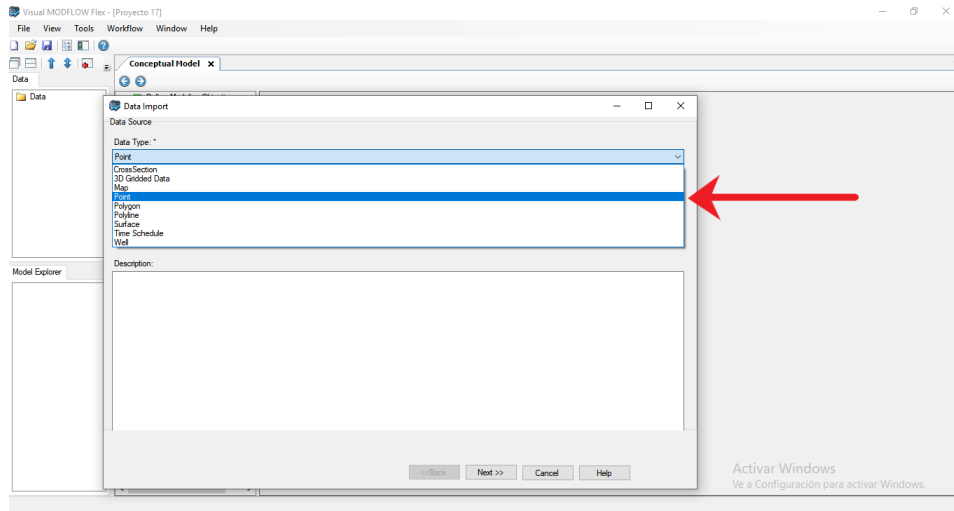


Figura 4.22: Importación de los archivos de tipo punto.

En la ventana emergente al momento de la importación de los archivos de punto se seleccionó la configuración como se muestra en las Figuras 4.23 y 4.24.

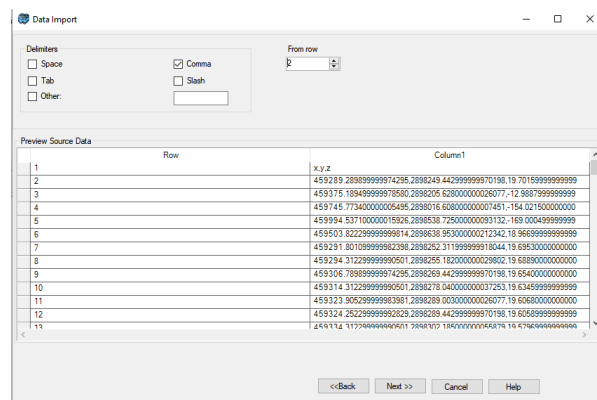


Figura 4.23: Configuración de importación de archivos tipo punto.

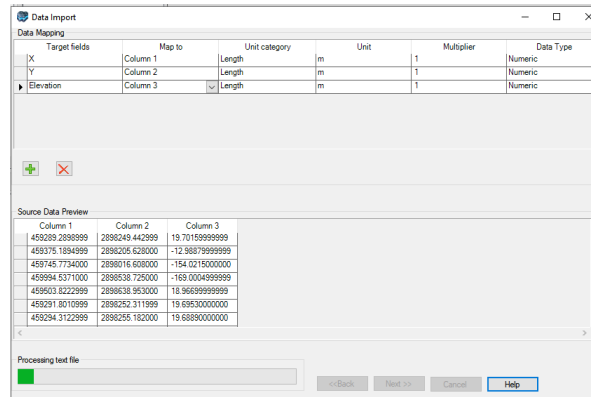


Figura 4.24: Configuración de importación de archivos tipo punto.

Una vez cargados los archivos de tipo punto, se realizó una superficie con cada uno de los archivos, los cuales corresponden a las unidades hidroestratigráficas (Figura 4.25).

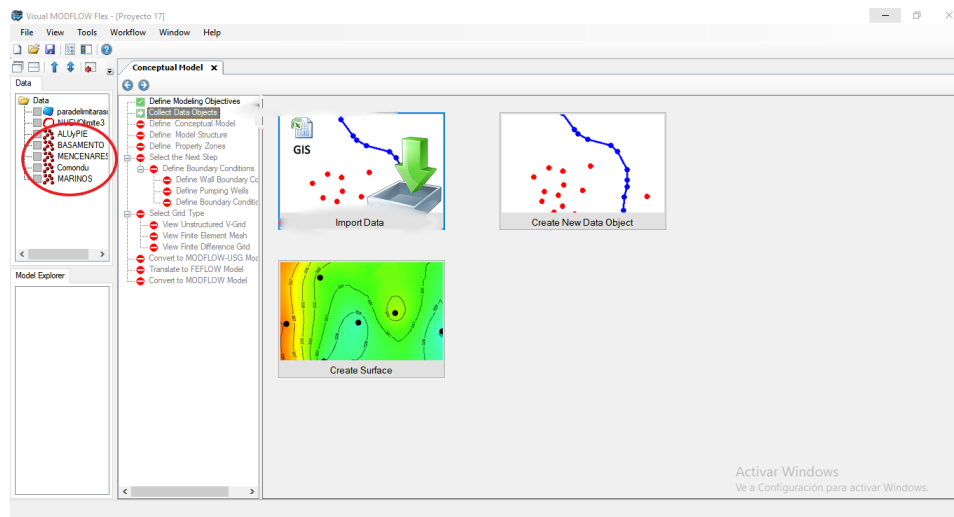


Figura 4.25: Archivos cargados tipo punto.

La creación de superficies de los archivos se realizó por medio de la interpolación de estos. Esta acción se hace dando click derecho a cada uno de los archivos de tipo punto y de la topografía (Figura 4.26).

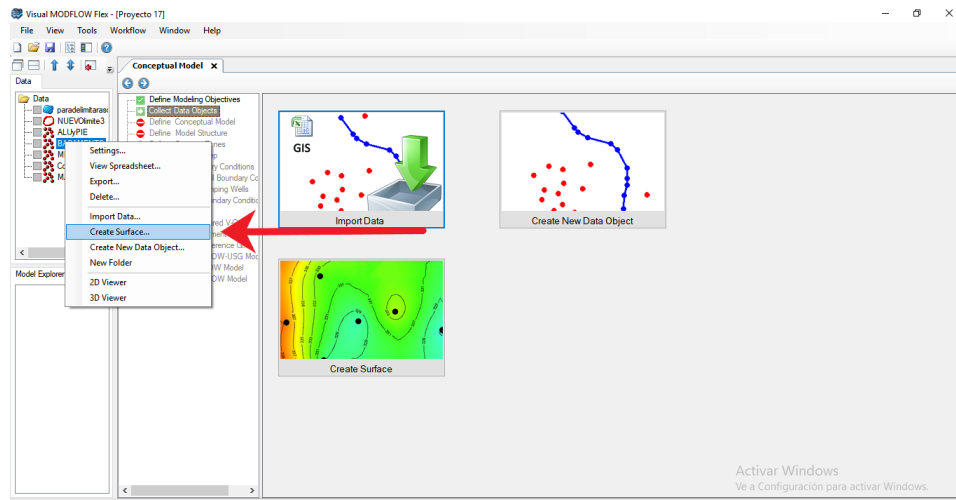


Figura 4.26: Creación de superficies.

Se selecciona el archivo tipo punto que se desea interpolar (Figura 4.27), y se mantiene la configuración preestablecida (Figura 4.28).

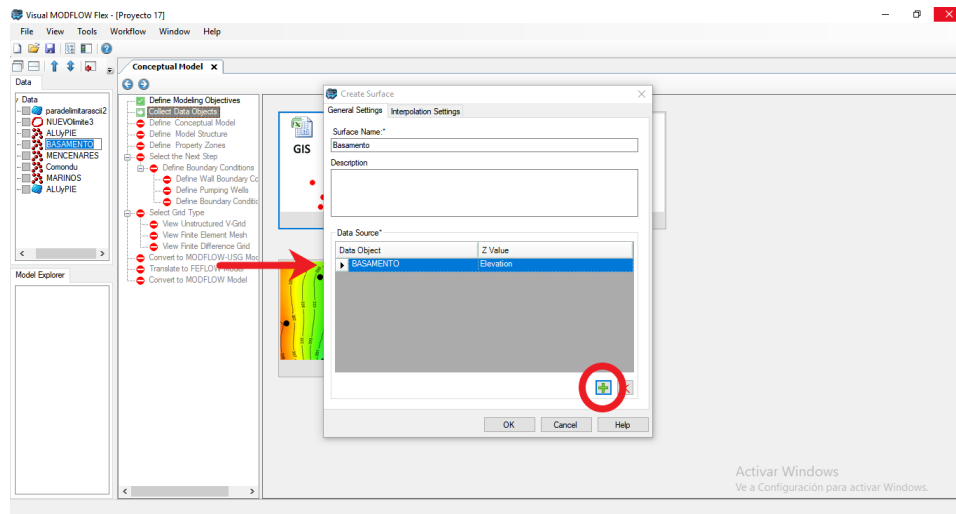


Figura 4.27: Selección del archivo a interpolar.

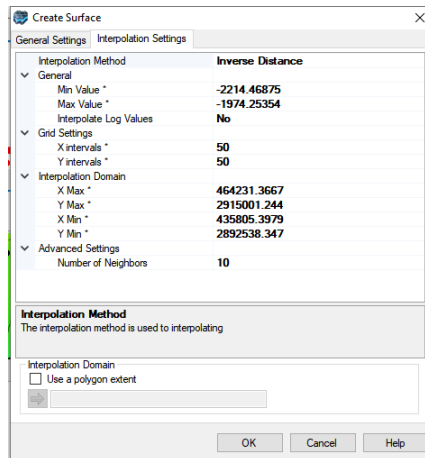


Figura 4.28: Configuración de la interpolación.

La superficie creada aparece en la ventana "Data" y se visualiza haciendo 'click' derecho en la superficie y seleccionando "3D Viewer" (Figura 4.29). Se abre una pestaña que muestra la superficie seleccionada (Figura 4.30), así mismo se pueden seleccionar otras superficies para ser visualizadas en el mismo visualizador que se se abrió.

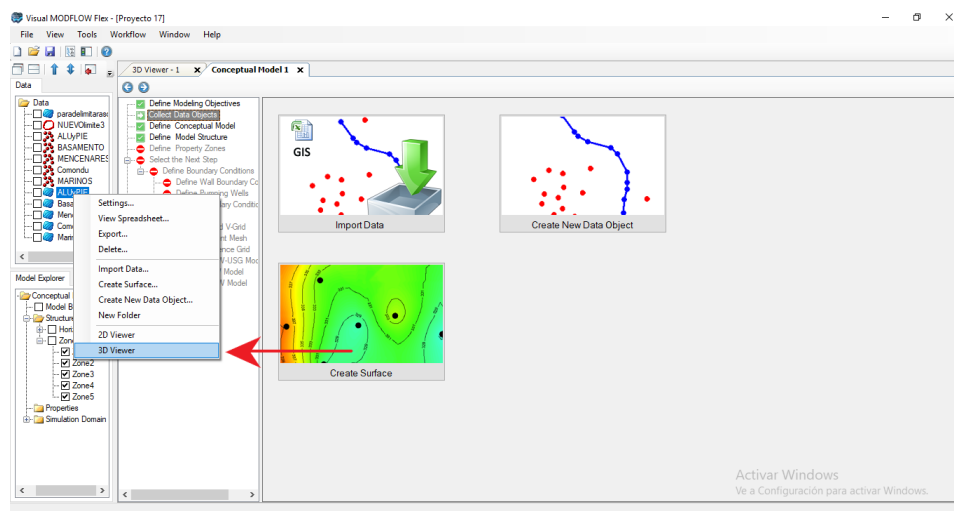


Figura 4.29: Abrir visualizador de superficies en 3 dimensiones.

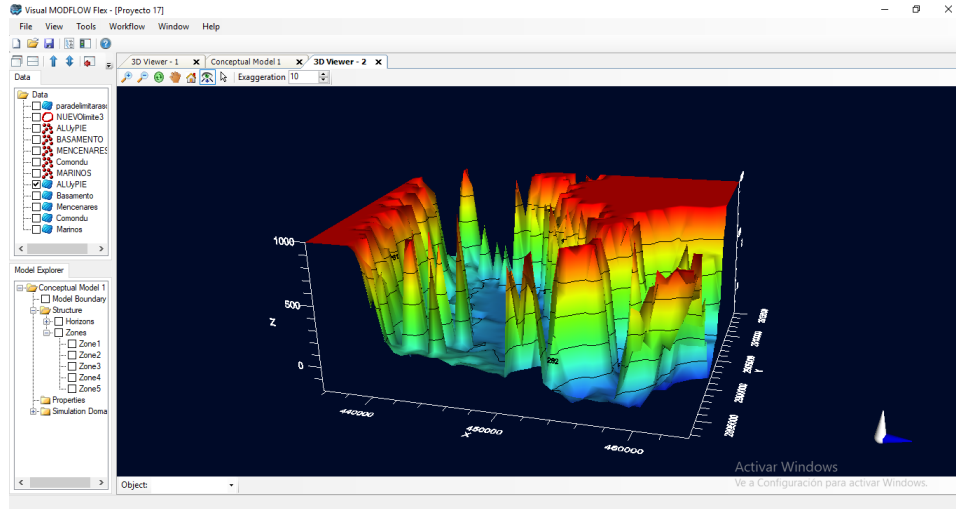


Figura 4.30: Visualización de superficies en 3D.

Posteriormente, en el paso “Define Conceptual Model” se selecciona al polígono que delimita el área de estudio en la entrada de archivo “Model Area” (Figura 4.31) y se guarda el proyecto.

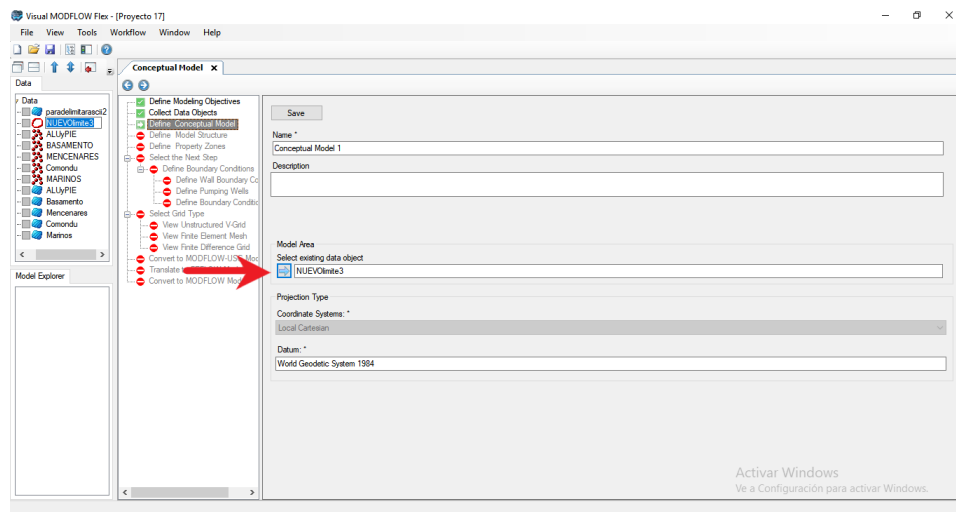


Figura 4.31: Selección de archivo para delimitar el área del modelo.

En el paso siguiente, “Define Model Structure” se crean los horizontes con el botón “Add Horizont”, en los cuales por orden estratigráfico se insertan las superficies anteriormente creadas (Figura 4.32).

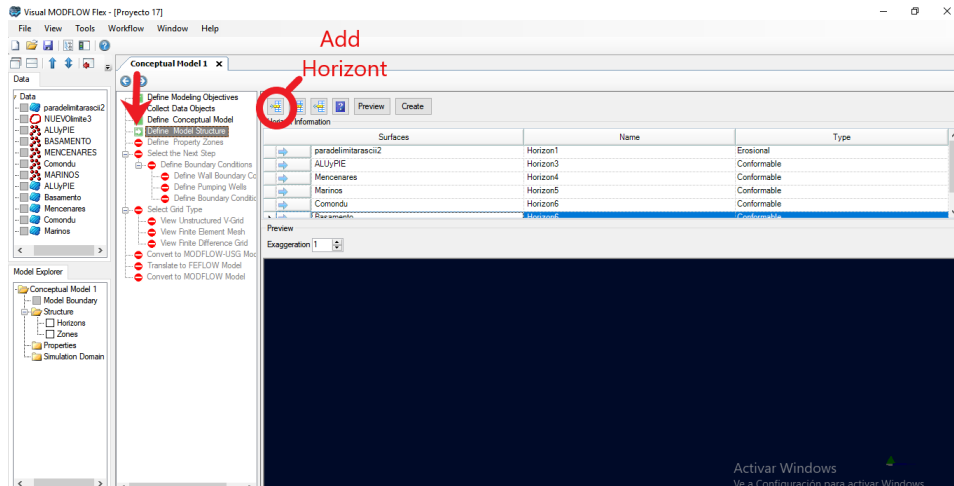


Figura 4.32: Horizontes seleccionados, de los archivos de superficie creados.

Para crear el modelo, la selección del tipo de horizonte para cada una de las superficies se muestra en la Figura 4.33.

Surfaces	Name	Type
paradelimitarascii2	Horizon1	Erosional
ALUyPIE	Horizon3	Conformable
Mencenares	Horizon4	Conformable
Marinos	Horizon5	Conformable
Comondu	Horizon6	Conformable
Basamento	Horizon6	Conformable

Figura 4.33: Selección del tipo de horizonte.

Se hace click en el botón “Preview” y posteriormente, al botón “Create” para crear el modelo conceptual (Figura 4.34). De esta forma se generan las zonas que representan en 3D a cada una de las unidades hidroestratigráficas (Figura 4.35).

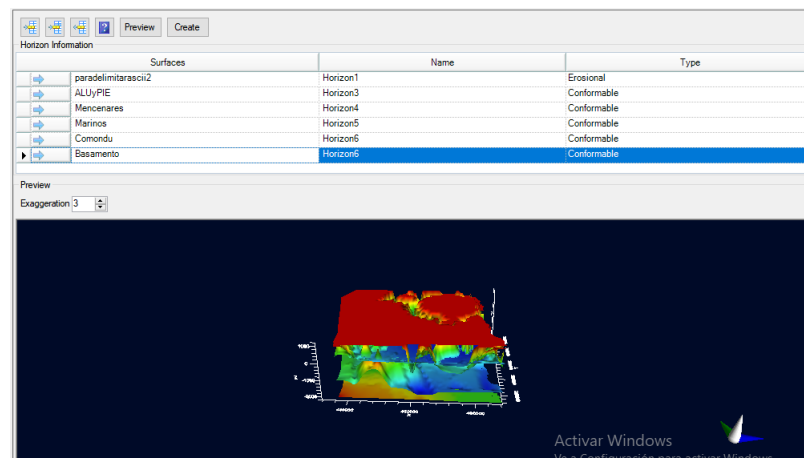


Figura 4.34: Previa del modelo conceptual.

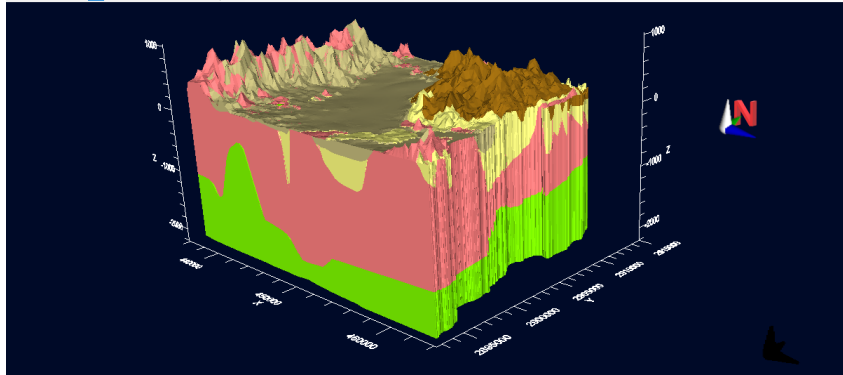


Figura 4.35: Visualización de la creación del modelo conceptual por zonas.

4.3. Generación del Modelo Numérico

El modelo numérico fue definido con el método de diferencias finitas en una malla de 100 celdas por 100 celdas. La dimensión de la celda es de 208.148 m de ancho por 208.148 m de largo por 213.967 m de alto. Además, se definió la capa 1 para el acuífero libre, la capa 2 para el acuífero confinante, la capa 3 para el acuífero semiconfinado, la capa 4 para el acuífero fracturado y la capa 5 para el basamento granítico.

4.3.1. Definición de celdas activas e inactivas

En MODFLOW se usa la herramienta de desactivación de celdas con el propósito de reproducir la dinámica del flujo subterráneo a través de las celdas. Es decir, se trabaja con celdas inactivas cuando se trata de inhabilitar por completo el flujo a través de un grupo de celdas en particular. Con esto se entiende que la resolución de la Ecuación de flujo subterráneo estará restringida únicamente para las celdas activas.

En el caso de este modelo la desactivación de ciertas celdas fue requerida y se explicará la definición de estas para cada capa:

Para las capas 1 (Acuífero Libre), 2 (Acuífero Confinado), 3 (Acuífero Semiconfinado) y 4 (Acuífero Fracturado) (Figura 4.36) se desactivaron las celdas correspondientes a la Sierra La Giganta, el Complejo Volcánico Mancenares y los afloramientos del basamento granítico. En el primer caso se optó por dejar a la sierra inactiva para simular que el flujo que entra por las fracturas de la sierra no recargue al acuífero libre o al acuífero semiconfinado, sino que recargue únicamente a profundidad al acuífero fracturado. Esta idea se complementa definiendo una condición de frontera en la capa 4 siguiendo el contacto de la sierra (Figura 4.39), la cual ingresa el volumen que recarga por las fracturas de la sierra, sin esta condición no recargaría ningún flujo al acuífero fracturado, ya que las celdas de

la sierra en la capa 1 están inactivas. En el segundo caso, el Cerro Mancenares se desactivó porque tiene características de tipo impermeables, las cuales inhabilitan el posible flujo subterráneo. Por último, el caso de los afloramientos del basamento granítico se desactivó porque esta formación es el límite inferior del acuífero y se requiere que limite el flujo.

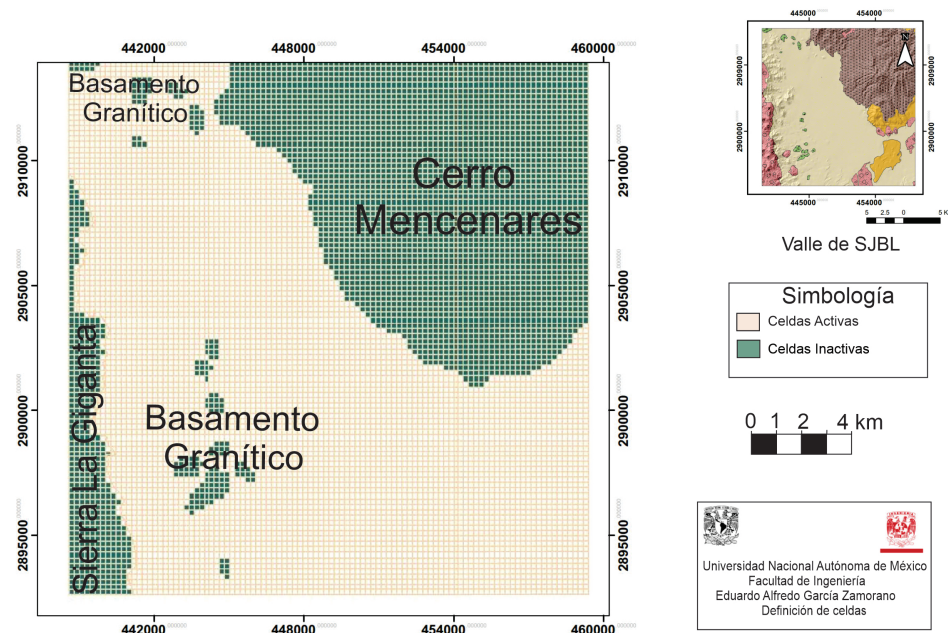


Figura 4.36: Definición de celdas para las capas 1, 2, 3 y 4.

Por otro lado la capa 5 (Figura 4.37) se desactivó por completo, ya que se entiende a esta capa como el límite inferior del sistema acuífero.

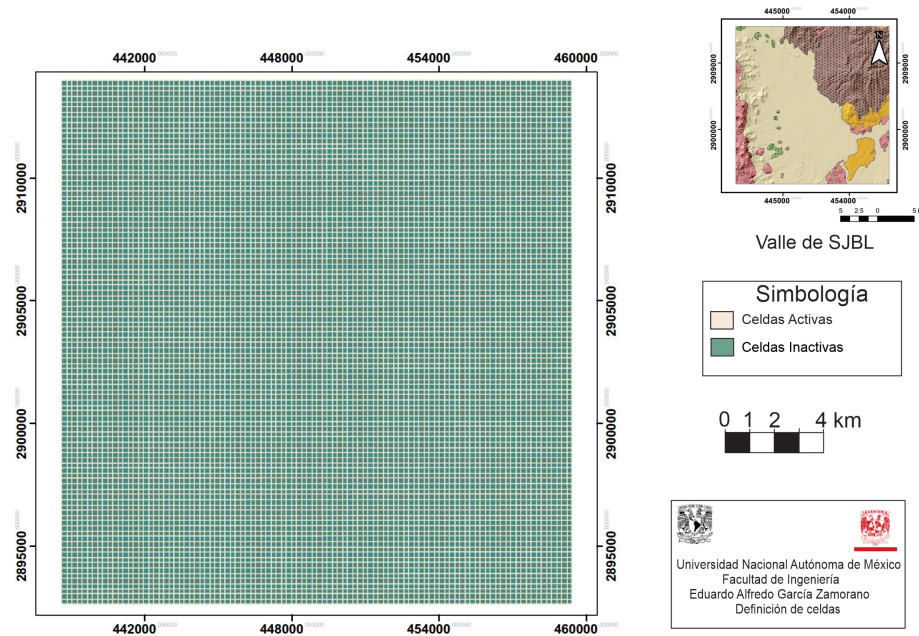


Figura 4.37: Definición de celdas para la capa 5.

4.3.2. Condiciones de frontera del modelo numérico

En todo modelo numérico es indispensable definir condiciones en las fronteras del modelo. Para este estudio se definieron 2 tipos de condiciones de frontera en la Ecuación de flujo: las condiciones de tipo 1 (tipo Dirichlet) y la de tipo 2 (tipo Neumann). Además de definir condiciones en las fronteras del dominio, se definieron condiciones de tipo 1 en el interior, para los puntos donde la carga h es conocida.

En los modelos hidrogeológicos el uso de las condiciones de frontera precisa la definición para cada celda en la malla donde se haya definido la condición de frontera en cuestión. Por ejemplo, con la condición de tipo 1 se le indica un valor de carga hidráulica determinado a las celdas involucradas. Por el otro lado, con la condición de tipo 2 se le especifica el volumen de flujo que va a pasar por las celdas, ya sea de entrada (signo positivo) o de salida (signo negativo).

De esta manera se establecieron condiciones de tipo 2 para cada una de las fronteras del modelo, de manera conjunta se definieron condiciones de tipo 1 en las fronteras N, S y E, estas últimas únicamente establecidas para las fronteras en la capa 1. Además, dentro del dominio se establecieron condiciones de tipo 2 (para la capa 1) en 17 celdas, en donde se tomó como referencia el valor observado de carga reportado de los pozos estudiados por IGF⁵ de 1985 a 1986.

⁵Instituto de Geofísica. 1986. Estudio Geohidrológico-Geofísico en la cuenca de San Juan Bautista Londó, Municipio Comondú, Reporte para SARH, México: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, México.

En las siguientes Figuras (Figura 4.38 y Figura 4.39) se sintetizan las condiciones de tipo 1 y de tipo 2 definidas en el modelo, a excepción de la condición de tipo 2 que representa la recarga vertical, la cual está definida para todas las celdas activas de la capa 1 con un valor de 5.85 mm/año para cada celda y un valor total de 39 349 mm/año. Cabe mencionar que la recarga real en mm fue ajustada a las dimensiones de la celda del modelo.

Como especificación de los volúmenes empleados en cada una de las condiciones de tipo 1, es importante mencionar que se tomaron del balance hidrogeológico del capítulo 3, sin embargo, para los acuíferos subyacentes al acuífero libre se realizaron estimaciones con base en observaciones. Tal es el caso del flujo horizontal que recarga al acuífero fracturado, del cual se estimó que de la recarga vertical en la Sierra La Giganta solo el 10% consigue ingresar y recargar a dicho acuífero. Así mismo, se aprovechó una porción del volumen de compensación, que es el volumen que el modelo de manera automática depuraba (durante la calibración) del sistema para llevar el nivel estático a las cargas especificadas en las condiciones de tipo 1 definidas. Esta porción mencionada fue implementada como volumen de descarga al mar en el acuífero semiconfinado y en el fracturado, con un fin conjunto de disminuir el volumen de compensación por salida que arrojaba la simulación.

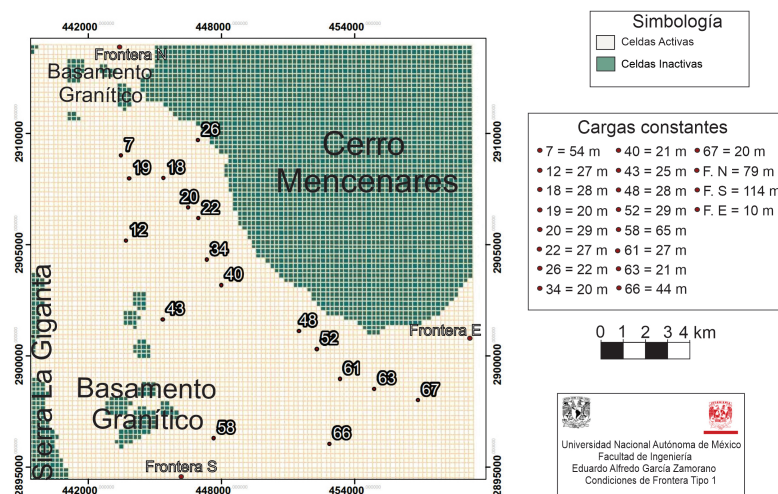


Figura 4.38: Condiciones Tipo 1.

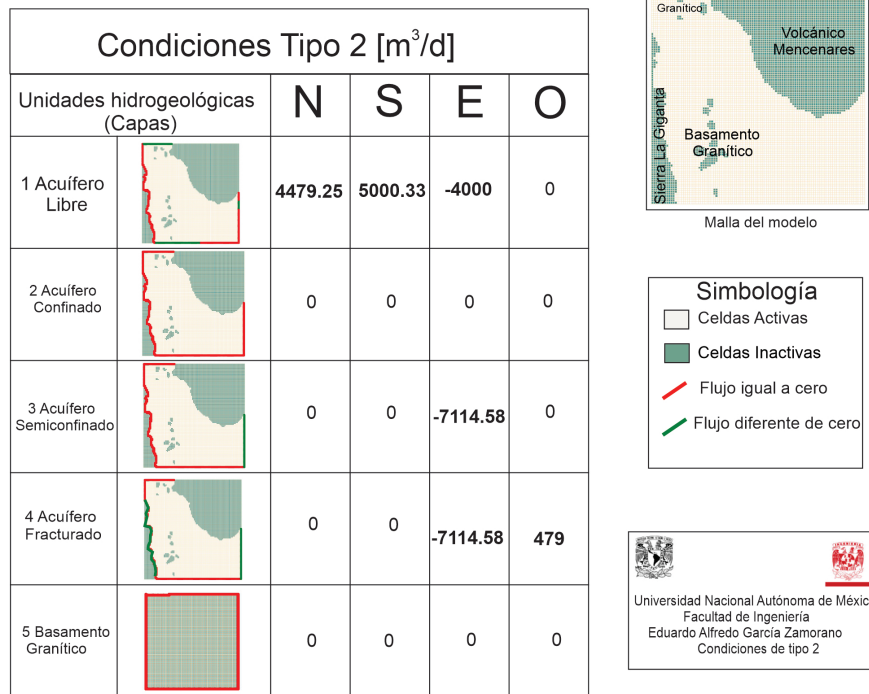


Figura 4.39: Condiciones Tipo 2.

4.3.3. Parámetros hidráulicos

Como punto de partida se emplearon los valores de conductividad hidráulica para el acuífero libre los valores calculados de los pozos de bombeo de Lesser (2006). Así mismo, para el resto de las unidades hidrogeológicas se tomó como punto inicial los valores consultados en bases de datos. Durante la calibración del modelo fue que dichos valores fueron modificándose hasta que se llegó a los valores que se presentan en la Tabla 4.1. Cabe resaltar que fue necesaria la distinción de conductividades entre el material del valle y el material del Piedemonte, ya que son distintos en granulometría y selección. Además, es posible observar que el acuífero confinante presenta los valores más bajos de conductividad hidráulica dada su granulometría de tamaño arcilloso. En la Tabla 4.1 y en la Figura 4.40 se muestran los valores de conductividad hidráulica para cada una de las unidades.

Tabla 4.1: Conductividades hidráulicas de cada unidad hidrogeológica.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad hidráulica		
	k_x	k_y	k_z
Acuífero Libre (valle)	1.5×10^{-5}	1.5×10^{-5}	1.5×10^{-5}
Acuífero Libre (Piedemonte)	8.5×10^{-5}	8.5×10^{-5}	8.5×10^{-5}
Acuífero Confinado	1×10^{-9}	1×10^{-9}	1×10^{-10}
Acuífero Semiconfinado	4.5×10^{-7}	4.5×10^{-7}	4.5×10^{-8}
Acuífero Fracturado	6×10^{-6}	6×10^{-6}	6×10^{-7}
Basamento Granítico	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-7}

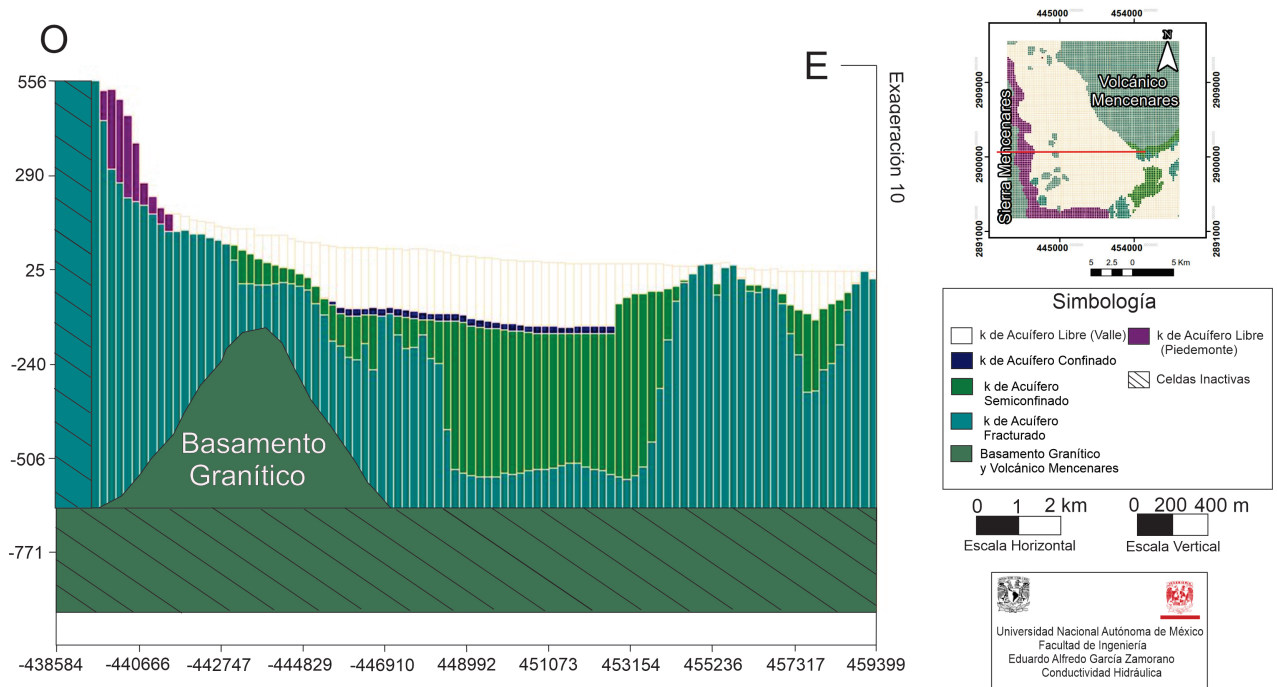


Figura 4.40: Unidades hidrogeológicas por conductividades hidráulicas.

4.3.4. Calibración en estado estacionario

El proceso de calibración se planteó de tal manera que el error cuadrático que arrojará la simulación estuviera por debajo del 5% de error de las cargas observadas vs las cargas calculadas por el modelo, además de que el volumen (volumen por compensación) con el que MODFLOW compensa para llevar los niveles de carga a los niveles establecidos en las condiciones (ya sea ingresando o expulsando flujo)

no fuera mayor al 100 % del total del volumen. Mientras no se cumplieran estas dos condiciones en las simulaciones los parámetros hidráulicos, los volúmenes de entrada y de salida, así como las condiciones de frontera podían ser modificadas con el fin de que se llegase a las condiciones de calibración que ya antes se mencionaron. En la Figura 4.41 el diagrama de flujo ilustra el algoritmo que se adoptó para la calibración.

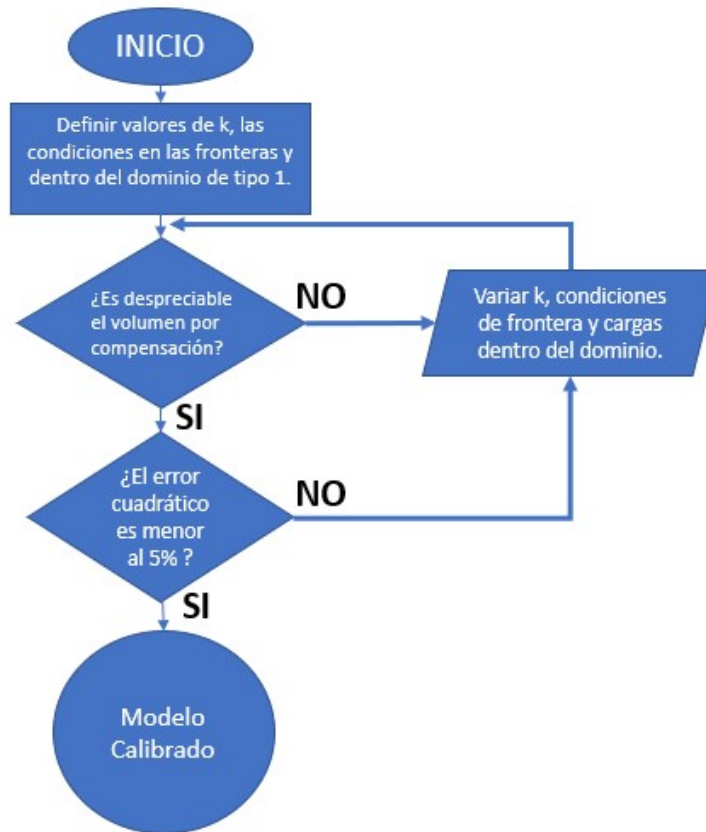


Figura 4.41: Diagrama de flujo para la calibración.

Como se mencionó, un punto de referencia importante durante el proceso de calibración fue el cálculo de la raíz del error cuadrático medio de las cargas observadas vs las cargas calculadas, el cual indica la exactitud del modelo. Por medio de una gráfica de cargas calculadas contra observadas (cargas medidas en campo) es posible visualizar preliminarmente la exactitud de la simulación. De los valores graficados se proyecta una recta que marca su tendencia, de tal manera que entre más cercanos se encuentren los valores a la recta, mayor es la exactitud del modelo (Figura 4.42).

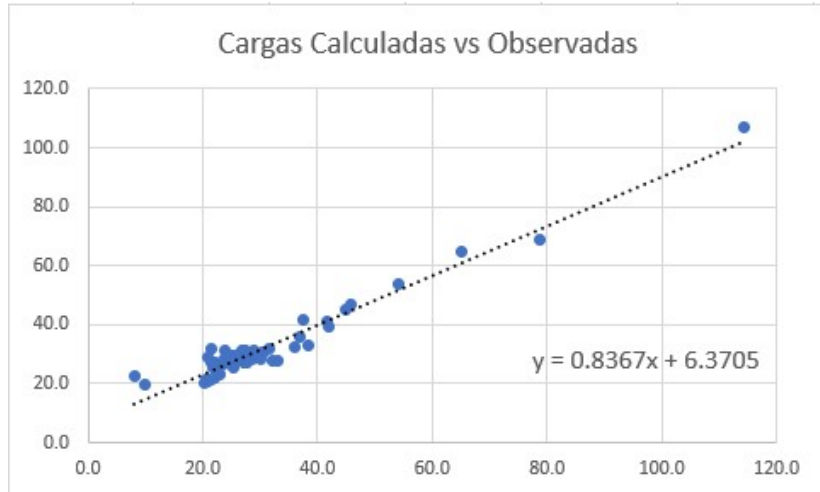


Figura 4.42: Cargas Calculadas vs Cargas Observadas.

Así mismo, la recta de tendencia se expresa en una función, la cual sirve para poder calcular la raíz del error cuadrático medio. Dicha función de la recta de tendencia es $y = 0,8367x + 6,3705$ La fórmula 4.1 sirve para calcular la raíz del error cuadrático medio.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(y'_i - y_i)^2}{n}} \quad (4.1)$$

Donde y' son los valores calculados y y son los valores observados ingresados en la función de la línea de tendencia. Finalmente, n es el numero de observaciones que se tienen.

En total se consideraron 59 cargas observadas distribuidas a lo largo del valle, desde el norte, sur y este del mismo. En la Tabla 4.2 se observan las 59 cargas que se implementaron para el modelo. El error resultó ser de 3%, el cual se encuentra dentro del rango aceptable para los modelos hidrogeológicos que es menor del 5%.

Tabla 4.2: Conductividades hidráulicas de cada unidad hidrogeológica.

Pozo	Carga Calculada [m]	Carga Observada [m]	Pozo	Carga Calculada [m]	Carga Observada [m]
6	68.7	78.7	42	27.7	32
7	54.0	54	43	25.4	25.4
8	31	28.9	44	27.8	26
9	32.8	38.2	45	28.5	23.8
10	32.4	36	46	31.3	23.8
11	36	37	47	29.6	25
12	27.6	27.8	48	28.5	28.5
13	31.3	27.3	49	29.6	27.8
14	31.8	21.5	50	29.3	27.7
15	39.2	42	51	29.4	26.6
16	27.6	33	52	29.5	29.5
17	28.8	21	53	29.6	28.7
18	28.2	28.2	54	29.6	28.7
19	30.2	30.2	55	29.4	25.7
20	29.5	29.5	58	65	65.0
21	28.8	28.6	59	46.6	45.8
22	27.6	27.6	60	28.3	29.9
23	27.0	21.6	61	27.1	27.1
24	27.3	27.6	62	28.4	26.1
25	26.4	23.6	63	21.0	21
26	22	22	64	41.0	41.5
29	30.7	30.5	65	41.9	37.6
30	31.9	31.5	66	44.9	44.9
34	20.3	20.3	67	21.4	20.4
35	27	22	68	22.3	8.0
36	29.2	27	69	19.4	10
37	29.2	24.8	70	23	23
38	27.8	23.6	74	106.8	114.3
39	25.7	21.8			
40	21.6	21.6			
41	31.3	26.9			

De manera conjunta, el proceso de calibración fue guiado por las observaciones en el volumen por compensación. De tal manera, se cuidó que las especificaciones previas del modelo no fueran erróneas. En la Tabla 4.3 se muestran en términos de porcentajes los volúmenes de flujo distinguidos en: volúmenes de compensación, recarga vertical y flujos subterráneos.

Tabla 4.3: Conductividades hidráulicas de cada unidad hidrogeológica.

Porcentajes de volúmenes		
Parámetro	IN (%)	OUT (%)
Volumen de compensación	57.4	44
Recarga Vertical	14.6	0
Flujo Subterráneo	28	56

Capítulo 5

Resultados y Discusiones

5.1. Piezometría

Al haber concretado la simulación del modelo en estado estacionario se obtuvieron los niveles de las cargas hidráulicas para el año 1986. Con esto se puede obtener un análisis en las direcciones de los flujos subterráneos, así como un mejor entendimiento de los sistemas jerárquicos del sistema acuífero. A partir de esta información obtenida se realizaron mapas de planta de las cargas hidráulicas simuladas, el primero de ellos muestra las direcciones del flujo subterráneo y el segundo incorpora los aprovechamientos simulados.

En la Figura 5.1 se puede observar que las direcciones del flujo provienen de norte, sur y oeste. El flujo proveniente del sur representa el mayor aporte de agua al valle, dado que estructuralmente no existe alguna barrera al flujo importante capaz de obstruir el avance del mismo. El flujo del norte es el segundo aporte importante de flujo subterráneo, sin embargo, a profundidad la estructura impermeable del basamento granítico limita de manera mesurada el aporte de agua al valle. Al oeste, el valle también recibe un cierto volumen de agua que aporta el Piedemonte a las cercanías de la Sierra La Giganta. Debido al gradiente hidráulico en el Piedemonte es de esperar que el aporte desde esta unidad sea importante, sin embargo, dado que las lluvias en esta región son escasas, las contribuciones del flujo subterráneo del norte y del sur toman un papel más protagónico. Encima, el caudal de lluvia de la Sierra La Giganta recarga directamente al acuífero fracturado por medio de las fracturas presentes en esta unidad.

De manera general, se puede destacar que el flujo tiende a converger en el valle, independientemente de la alteración de la dinámica de flujo causado por la extracción de pozos. Esto último se observa en el gradiente hidráulico descendente en dirección al valle. Así mismo, cabe destacar la inexistencia de un parteaguas hidráulico entre el valle y la desembocadura debido a la poca extracción en la desembocadura para el lapso de 1985-1986. Debido a esto, el flujo subterráneo fluye desde el valle hasta la desembocadura y posteriormente se descarga hacia

el mar. Se observa también que no hay flujo subterráneo proveniente desde el Complejo Volcánico Mecnencares dado su carácter impermeable.

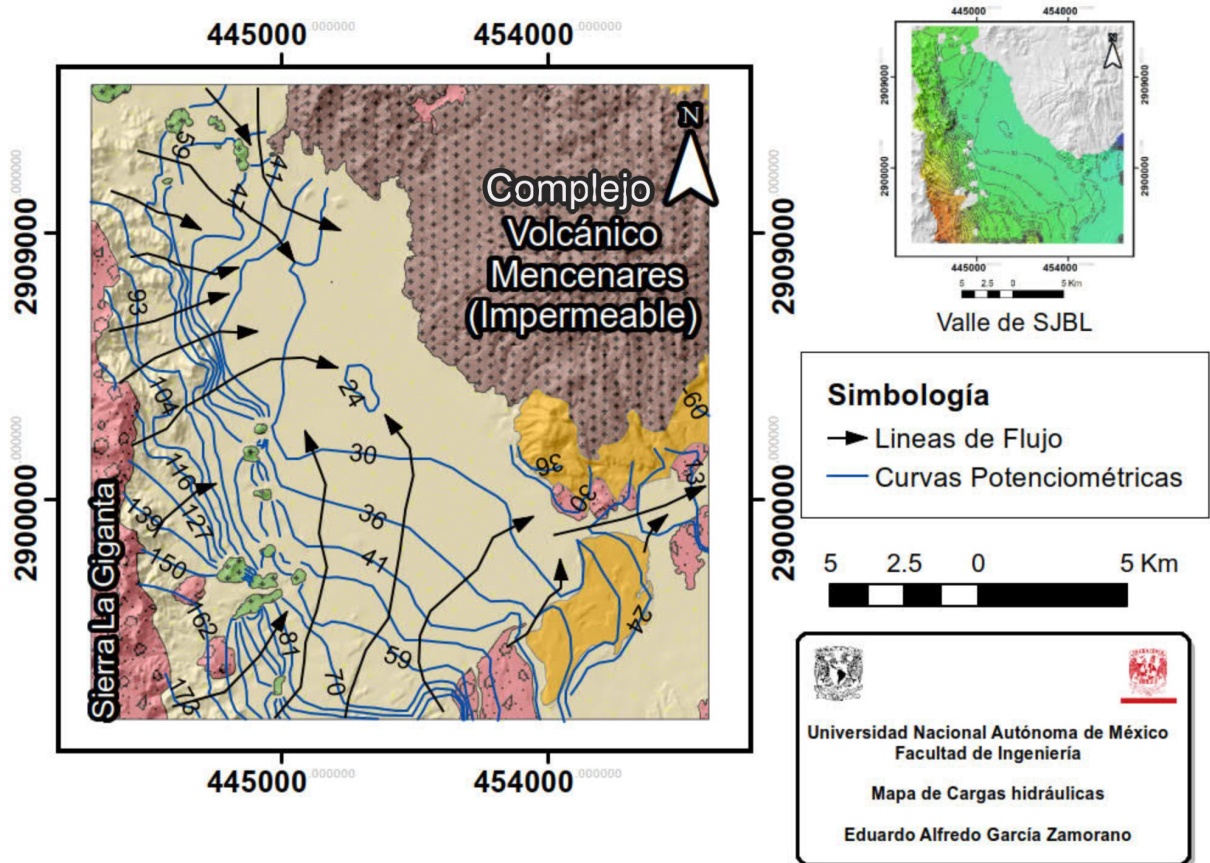


Figura 5.1: Mapa de Cargas hidráulicas con direcciones de flujo.

En la Figura 5.2 se tienen los niveles potenciométricos con los abastecimientos simulados. Las curvas isotopotenciales se observan alteradas por los pozos instalados en el valle. Al sur de este se tiene un grupo de aprovechamientos, dentro de los cuales se encuentra el manantial referido con el número 74, el cual representa la carga hidráulica más alta de la región. El valor de carga en este manantial indica un gradiente hidráulico pronunciado hacia el valle. La mayor parte de los aprovechamientos se concentran en el centro del valle, donde los flujos provenientes del norte, sur y oeste convergen. Así mismo, en el norte del valle se presentan las mayores alteraciones de los niveles, las cuales coinciden con la zona de cultivo de la región. En los pozos 40 y 34 es donde se presenta el mayor cono de abatimiento, esta extracción altera los niveles al sur, norte y oeste. En la desembocadura de San Bruno los aprovechamientos que se tienen no modifican la dinámica de flujo presente.

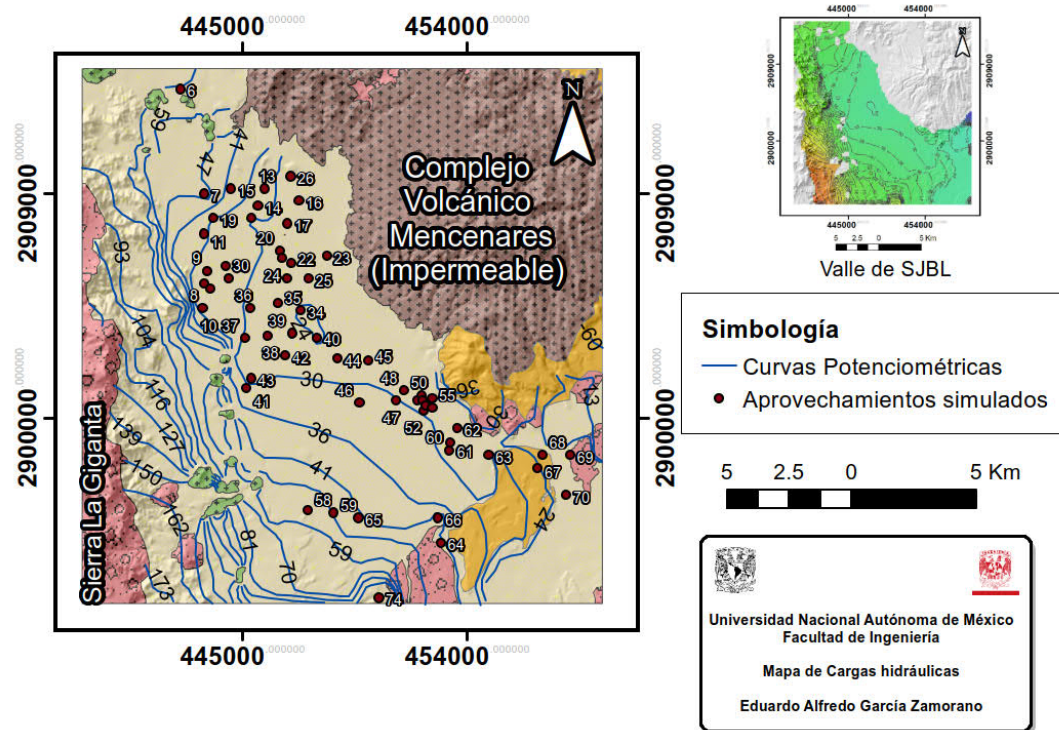


Figura 5.2: Mapa de Cargas hidráulicas con aprovechamientos.

5.2. Dinámica del flujo del acuífero

La dinámica del flujo subterráneo en el Valle de SJBL está ilustrado por medio de 6 secciones, 1 sección longitudinal, 3 secciones transversales y 2 secciones transversales a la desembocadura de San Bruno. Tal y como se muestra en la Figura 5.3, las secciones fueron distribuidas de tal manera que se capturaran algunas conjeturas del valle. En primer lugar, la sección A se localiza en el norte del valle y pasa por la zona agrícola, en donde la mayor parte de la extracción es para fines de cultivo. La sección B corre por el límite sur de la zona de cultivo y en esta zona disminuye la densidad de pozos con respecto a las zona por donde pasa la sección A. La sección C pasa por la Sierra la Giganta, cruza el valle por la localidad de San Juan Bautista Londó hasta la desembocadura de San Bruno. En su recorrido por el valle segmenta un pozo de interés llamado El Imposible, el cual se conoce por su alta saturación en sales (conocimiento por comunicación verbal). Además la sección C abarca de manera longitudinal a la desembocadura de San Bruno. La sección D cruza el valle longitudinalmente pasando por diversos afloramientos del basamento granítico al sur, al centro del modelo por la zona de cultivo, y al norte nuevamente corta por los afloramientos del basamento granítico. La sección E corta en el sur a la Falla Loreto y al norte cruza por la Falla oriental del graben. Finalmente, la sección F corta a la desembocadura de San Bruno en dirección

S-N y pasa por el pozo AC-1 que la CFE perforó en 1997¹, además de cruzar dos rasgos estructurales con dirección NE, los cuales son más recientes a los que dieron origen al graben con dirección NO.

El área que abarca las secciones comprende el dominio de estudio, es decir, a las celdas que se definieron como activas para su simulación, únicamente en dicha zona se tiene información del flujo y de las cargas hidráulicas.

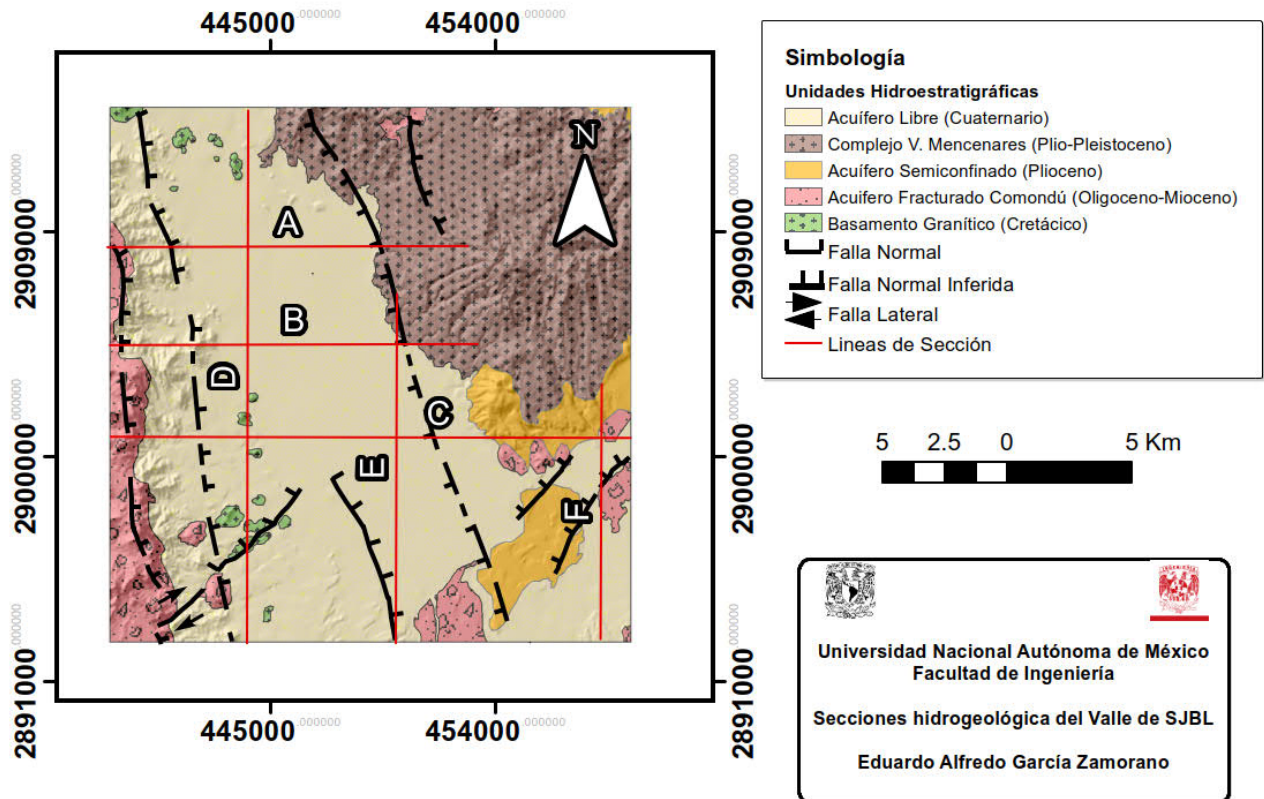


Figura 5.3: Mapa de Cargas hidráulicas con aprovechamientos.

Sección A

En la sección es posible observar que la dirección de flujo es al este. Se presenta recarga en el acuífero fracturado desde la Sierra La Giganta. En el centro del valle el flujo se vuelve ascendente y se incorpora al acuífero semiconfinado y posteriormente al acuífero libre, únicamente en donde el acuífero confinado no está presente, dado que el acuífero confinado funciona como una barrera de flujo entre el acuífero libre y el acuífero semiconfinado. En el acuífero libre se observa un cono de abatimiento en el pozo 28, 13 y 15, y en la noria 7.

¹Comisión Federal de Electricidad. 1997. Propuesta para la localización de pozos de gradiente en el Centavito, Agua Caliente y Santispec, BCS. Reporte GG-CBI-019/96. Gerencia de Proyectos Geotermoelectricos Subgerencia de Estudios, Departamento de Exploración.

Sección B

La dirección de flujo es hacia el este, de manera muy similar a la sección A la recarga ocurre en el acuífero fracturado. Conforme el flujo avanza hacia el este el flujo se torna ascendente y se comunica principalmente con el acuífero semiconfinado y en menor proporción con el acuífero libre, ya que el acuífero confinado restringe la comunicación entre acuíferos. A pesar de esto, la falla lístrica al oeste del valle facilita la comunicación entre acuíferos. Algo similar sucede con la falla al este del valle. El basamento granítico actúa como barrera al flujo debido a sus características impermeables.

Sección C

La dirección de flujo tiene dirección este y en el poniente existe la recarga directa al acuífero fracturado. En el valle el flujo se vuelve ascendente y tiene comunicación con el acuífero semiconfinado, y con el acuífero libre tiene comunicación por medio de los rasgos estructurales de las fallas normales que demarcan el graben. Cabe destacar que al oeste del valle se observa una conductividad baja en el acuífero fracturado, dado que las isopotenciales de carga hidráulica están muy juntas. Al este del valle, en la desembocadura de San Bruno se observa un flujo horizontal que descarga en el mar. Los pozos proyectados en la sección se encuentran en la localidad de San Juan Bautista Londó, en donde se observa un cono de abatimiento por la extracción.

Sección D

En la sección D se observa una dirección de flujo en dos direcciones desde el norte y desde sur hacia el centro del valle. De igual manera, la recarga sucede en el norte y en el sur en el acuífero libre, de donde el flujo fluye de manera descendente hacia el acuífero fracturado en el sur del valle y hacia el acuífero semiconfinado y fracturado en el norte del valle. Además, se puede visualizar de una manera más clara que el basamento granítico actúa como una barrera al flujo. Los pozos en el valle marcan una tendencia de la dirección del flujo provocando un cono de abatimiento.

Sección E

En la sección E se observa una dirección de flujo en dos direcciones: norte y sur. Se observa que la recarga del sur se desplaza de manera descendente hacia la capa semiconfinada. Además se observa un flujo más profundo en el acuífero fracturado que fluye en dirección norte. La falla de Loreto permite movilidad del flujo, de los acuíferos subyacentes al acuífero libre.

Sección F

En la sección F la dirección de flujo es hacia el norte principalmente. Se observa un flujo más profundo, el cual en la parte sur de la sección asciende hacia el acuífero semiconfinado. En la parte norte de la sección el flujo se comunica entre los acuíferos, por medio de las fallas estructurales de rumbo NE.

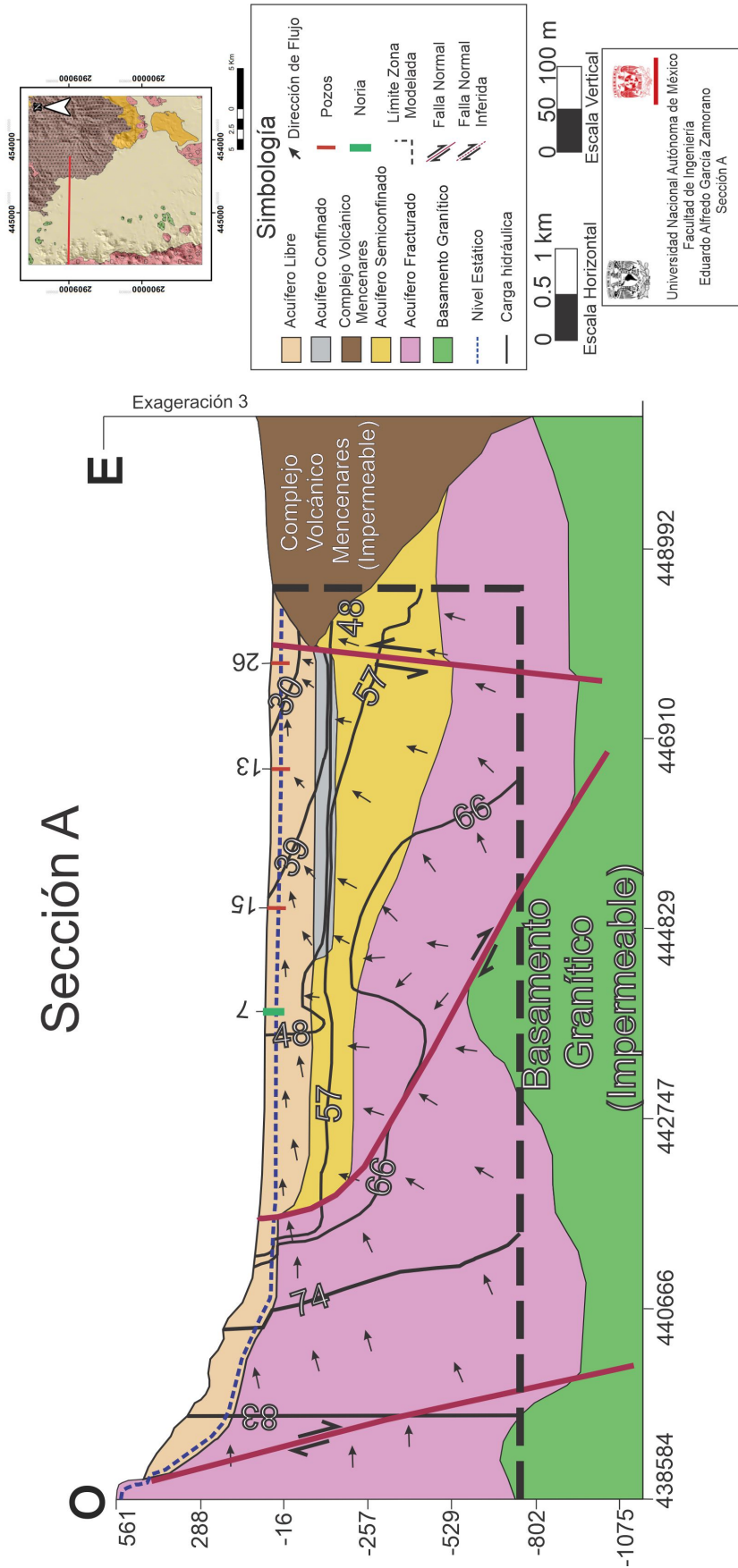


Figura 5.4: Sección hidrogeológica A.

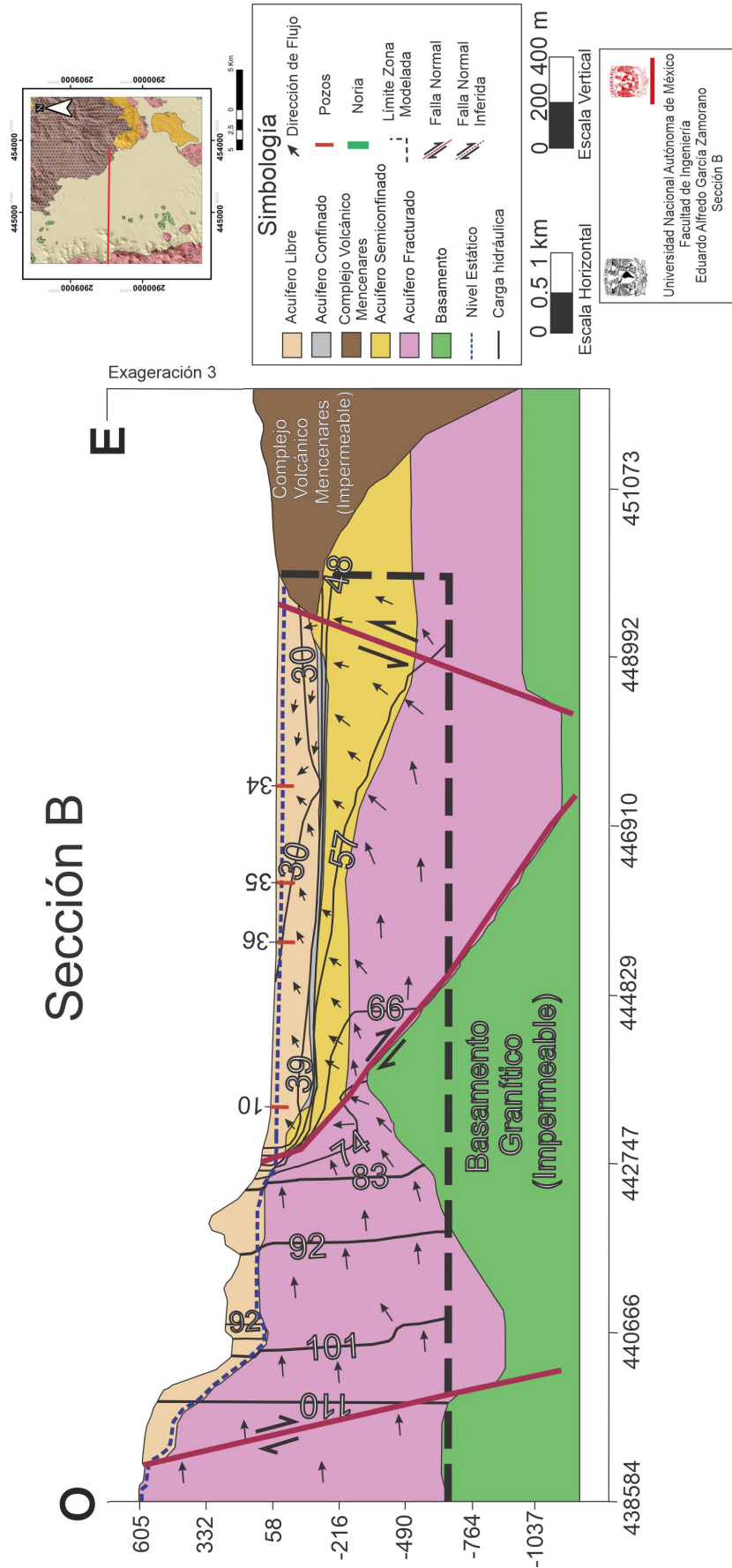


Figura 5.5: Sección hidrogeológica B.

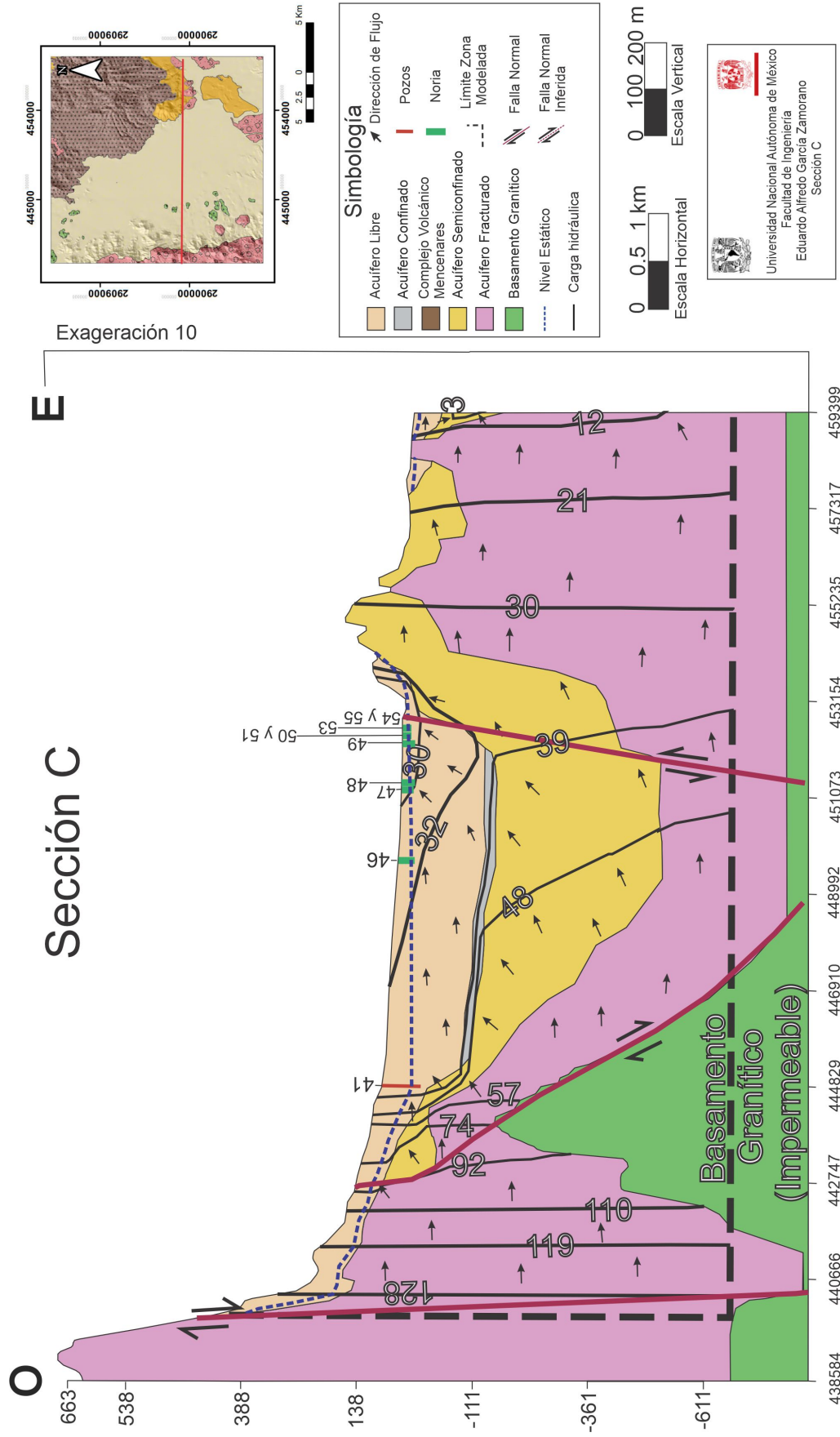


Figura 5.6: Sección hidrogeológica C.

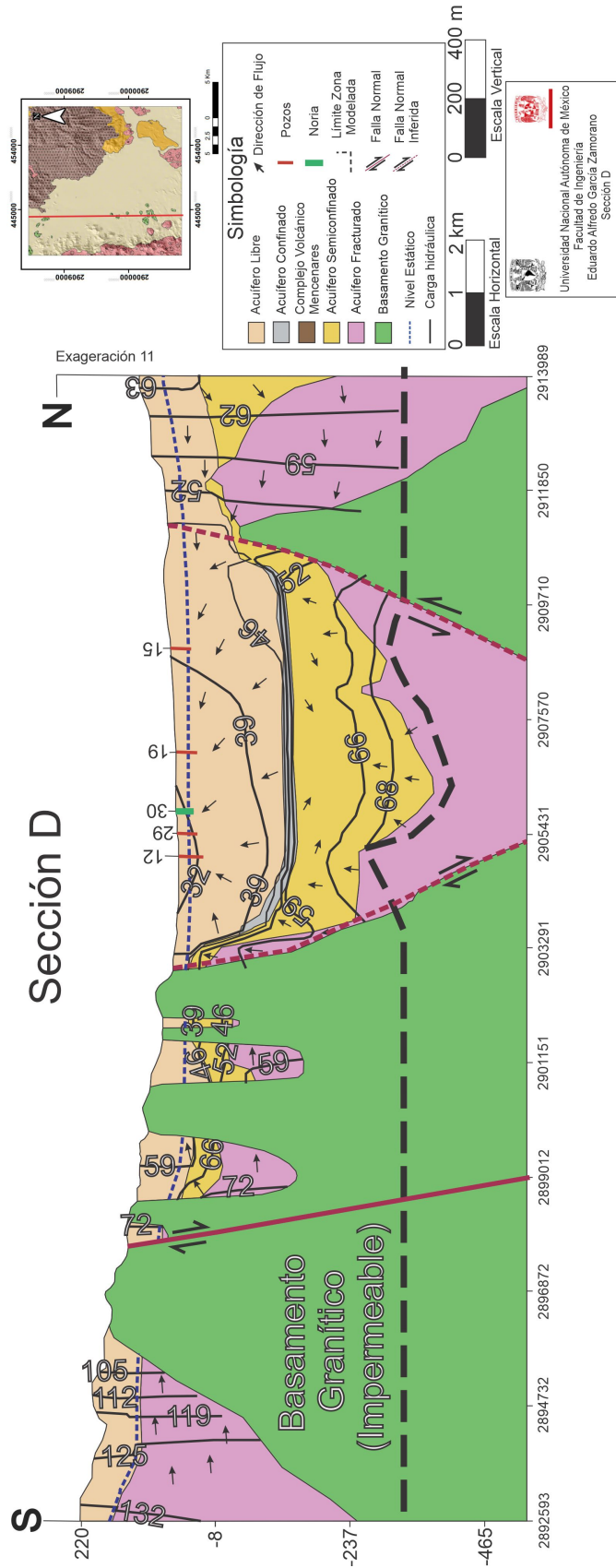


Figura 5.7: Sección hidrogeológica D.

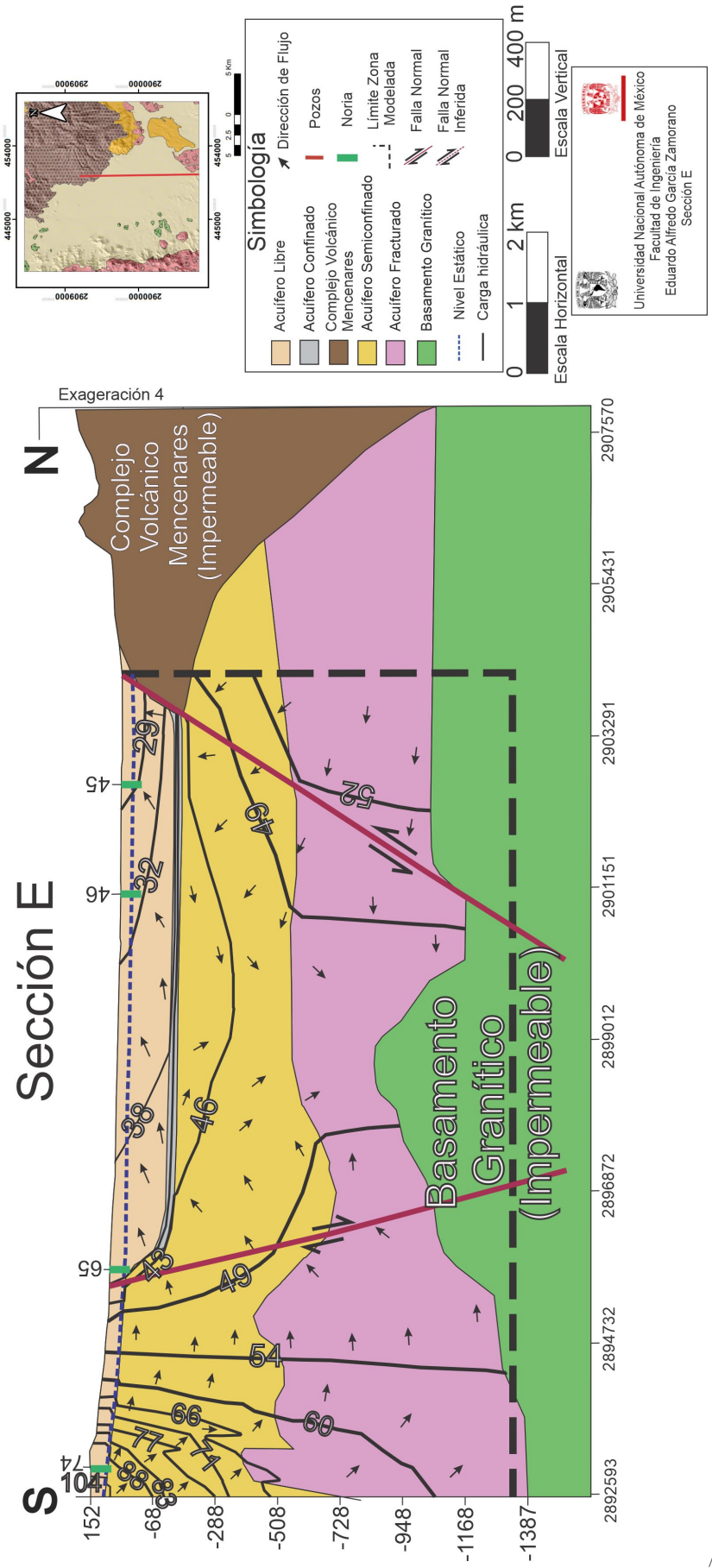


Figura 5.8: Sección hidrogeológica E.

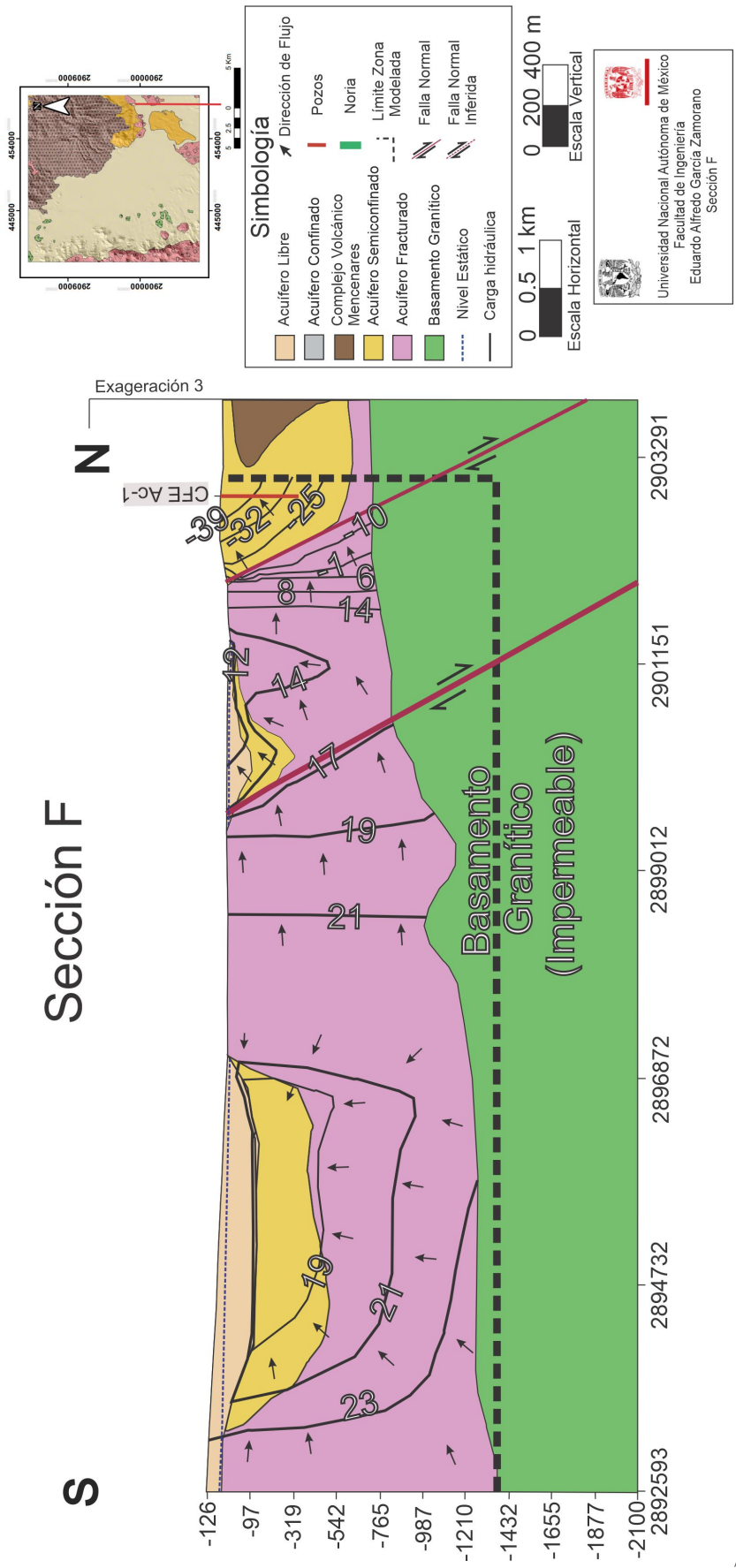


Figura 5.9: Sección hidrogeológica F.

5.3. Dinámica de los sistemas jerárquicos del flujo subterráneo

En términos generales se pueden percibir la distribución de los sistemas jerárquicos de flujo subterráneo a partir de las secciones. En el acuífero libre se observa un flujo local, el cual debido a la presencia de pozos se ve modificado y mezclado con un flujo posiblemente de carácter local-intermedio en lugares donde el acuífero confinado no está presente. Dicho flujo local intermedio prevalece en el acuífero semiconfinado, el cual se mezcla con un flujo intermedio-regional en las inmediaciones de la unidad semiconfinada y el acuífero fracturado. Por otro lado, el flujo regional está comprendido dentro del acuífero fracturado, dicho flujo tiene salida a superficie dada la comunicación entre las unidades por medio de las fallas que rigen el graben. Sin embargo, este fenómeno no ocurre en cada una de las fallas, ya que es necesario que el acuífero fracturado aflore o tenga una profundidad somera para que no se mezcle con los demás flujos en las demás unidades hidroestratigráficas y pierda su huella geoquímica. Tal es el caso en la sección F, al norte de la sección, donde el acuífero fracturado aflora y están presentes dos fallas que facilitan el traslado del flujo intermedio-regional y regional a la superficie. Esta dinámica coincide con la información geoquímica de diversos pozos recabada por el IGF en el año 2015. Dichos estudios de laboratorio denotan a la zona de Agua Caliente como un área con altas concentraciones en sales y con altas temperaturas, explicado a detalle en el Capítulo 3, Sección 3.3.2.

Se realizó una correlación de la simulación del flujo subterráneo con respecto al muestreo geoquímico realizado por el Instituto de Geofísica en 2015. Los resultados se muestran adelante, donde se desarrollaron 3 secciones (C, D y F). Dichas secciones permiten observar la jerarquización de los sistemas de flujo subterráneo a lo largo del valle (5.10), de manera transversal al valle (5.11), y transversal a la Desembocadura de San Bruno (5.12).

Sección C

En esta sección se denota la presencia del flujo local en el acuífero libre evidenciada por el análisis geoquímico de los pozos SJL-15-07, SJL-15-03 y SJL-15-01. El pozo SJL-15-07 tiene su principal recarga de flujo local el Piedemonte, de donde recarga una parte importante al acuífero libre. El flujo intermedio es aquel flujo que recarga por medio de las fracturas de la Sierra La Giganta pero que a diferencia del flujo regional, este fluye a través del acuífero semiconfinado. Este flujo gana profundidad en el acuífero semiconfinado y en la falla E del graben asciende por la permeabilidad secundaria de la falla y se moviliza hasta la Desembocadura de San Bruno, evidenciado por el muestreo en el pozo SJBL-15-12 con una temperatura de 31 °C y concentraciones de iones mayores por arriba de 4000 mg/l. El flujo regional es aquel flujo que tiene como recarga las fracturas de la Sierra La Giganta y se incorpora al acuífero fracturado, en donde con la presencia de la falla O del graben se profundiza para luego ascender por medio la falla E del graben. Cabe destacar que el fallamiento del graben permite que el flujo subterráneo tenga un

mayor grado de evolución, ya que es por este medio que profundiza, lo que resulta en una mayor interacción agua-roca, y en un mayor gradiente geotérmico. A su vez, es el fallamiento al E del graben lo que facilita su ascenso.

Sección D

En la sección D se observa que el flujo local se concentra en el acuífero libre para la zona sur de la sección. Sin embargo, es en la parte central de la sección, donde se encuentran los pozos SJL-15-15 y SJL-15-18 con temperaturas de 47.6 °C y 35 °C, y concentraciones de 1324 mg/l y 2195 mg/l, respectivamente, lo cual denota la presencia de flujo iniermedio-regional e intermedio, además de un ascenso repentino de estos flujos al acuífero libre. El ascenso de flujos profundos en el acuífero libre se debe al bombeo, aunado a esto, el fallamiento del graben facilita la movilización de los flujos profundos. La falla que permite este ascenso es la Falla Loreto, la cual se intuye que tiene continuidad hacia el centro del valle y hunde el bloque del basamento en el centro del valle. Al centro-norte de la sección el flujo intermedio y regional descienden, mientras que el flujo local domina el acuífero local, sustentado por el muestreo geoquímico de los pozos SJL-15-16 y SJL-15-19. Hacia el N de la sección, por medio de una falla inferida el flujo intermedio y regional ascienden y se tiene evidencia de esto por la firma geoquímica del pozo SJL-15-22 con una temperatura de 35 °C y concentraciones de 987.22 mg/l. Finalmente, al N del valle el basamento funciona como barrera del flujo intermedio y regional, impidiendo que los flujos continúen al N. Sin embargo, se infiere que del N proviene flujo regional e intermedio, igualmente limitados por el basamento.

Sección F

Para la sección F, dos direcciones de flujo convergen en el acuífero libre al sur de la sección, esto debido a que el afloramiento del acuífero fracturado funciona como un parteaguas limitando las direcciones del flujo local e intermedio. Al centro-sur de la sección, donde se acuña el acuífero libre y semiconfinado, el encuentro de dos flujos con direcciones contrarias hace que el flujo subterráneo tenga un ascenso. La dinámica del flujo en la parte norte de la sección esta dominada por dos fallas normales, las cuales permiten el ascenso del flujo intermedio y regional. Como evidencia de esto se tiene el muestreo geoquímico de los pozos SJL-15-23 y SJL-15-12 con temperaturas de 32 °C y 31 °C, y concentraciones de 1725 mg/l y 4129 mg/l. Dichos valores indican un aumento en la concentración de iones mayores y en las temperaturas, ya que el fallamiento funciona como un medio importante para que el flujo con más evolución ascienda. En el límite N de la sección se observa otra falla normal por donde el flujo regional asciende de manera importante hasta el área conocida como Agua Caliente, en esta zona la firma geoquímica de las muestras de los pozos SJL-15-25 y SJL-15-26 indican concentraciones de iones de casi 10 000 mg/l y temperaturas de más de 50 °C, confirmando así la presencia de flujos profundos en esta área y su movilidad por medio de las fallas.

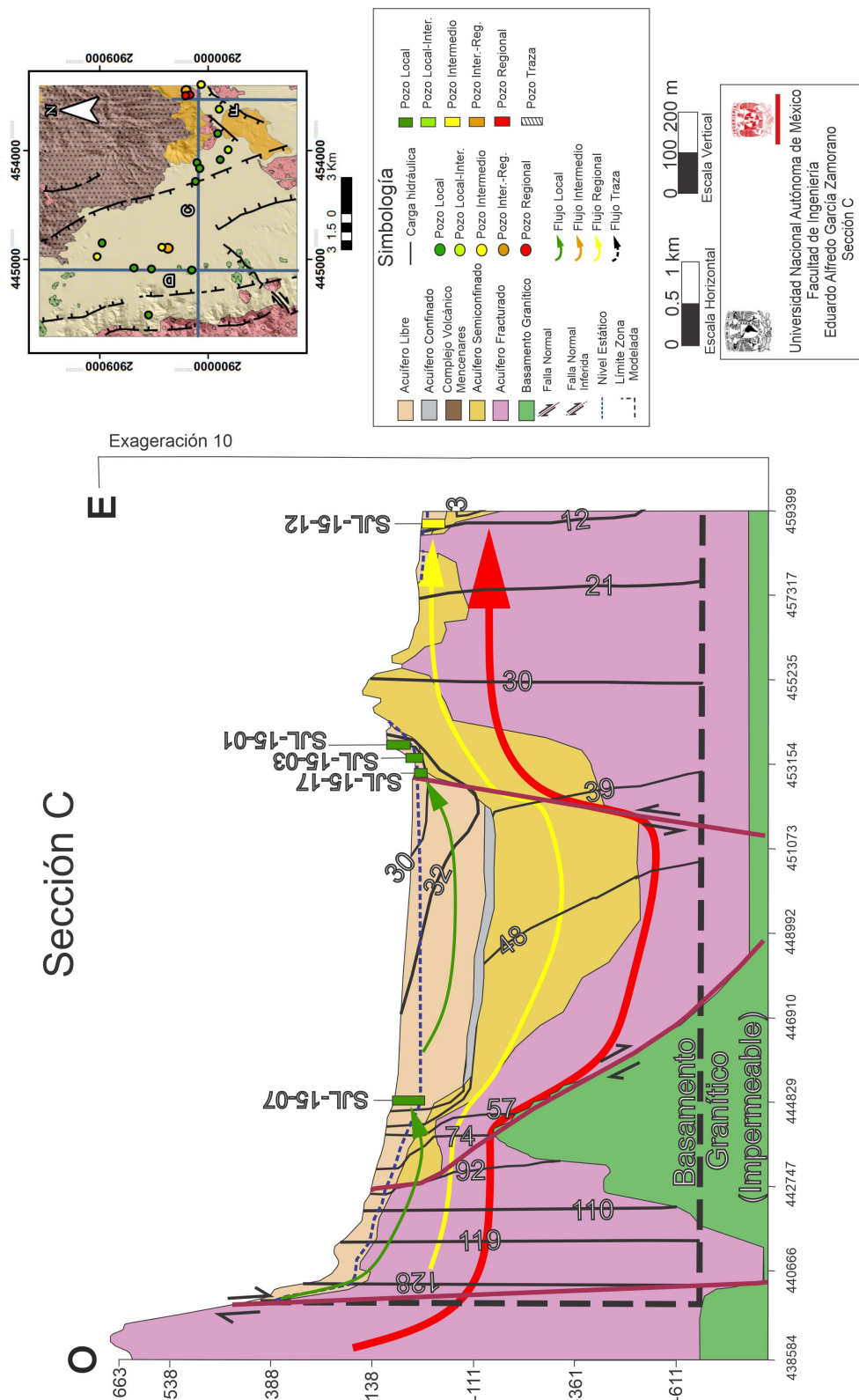


Figura 5.10: Sistemas jerárquicos del flujo subterráneo (Sección C).

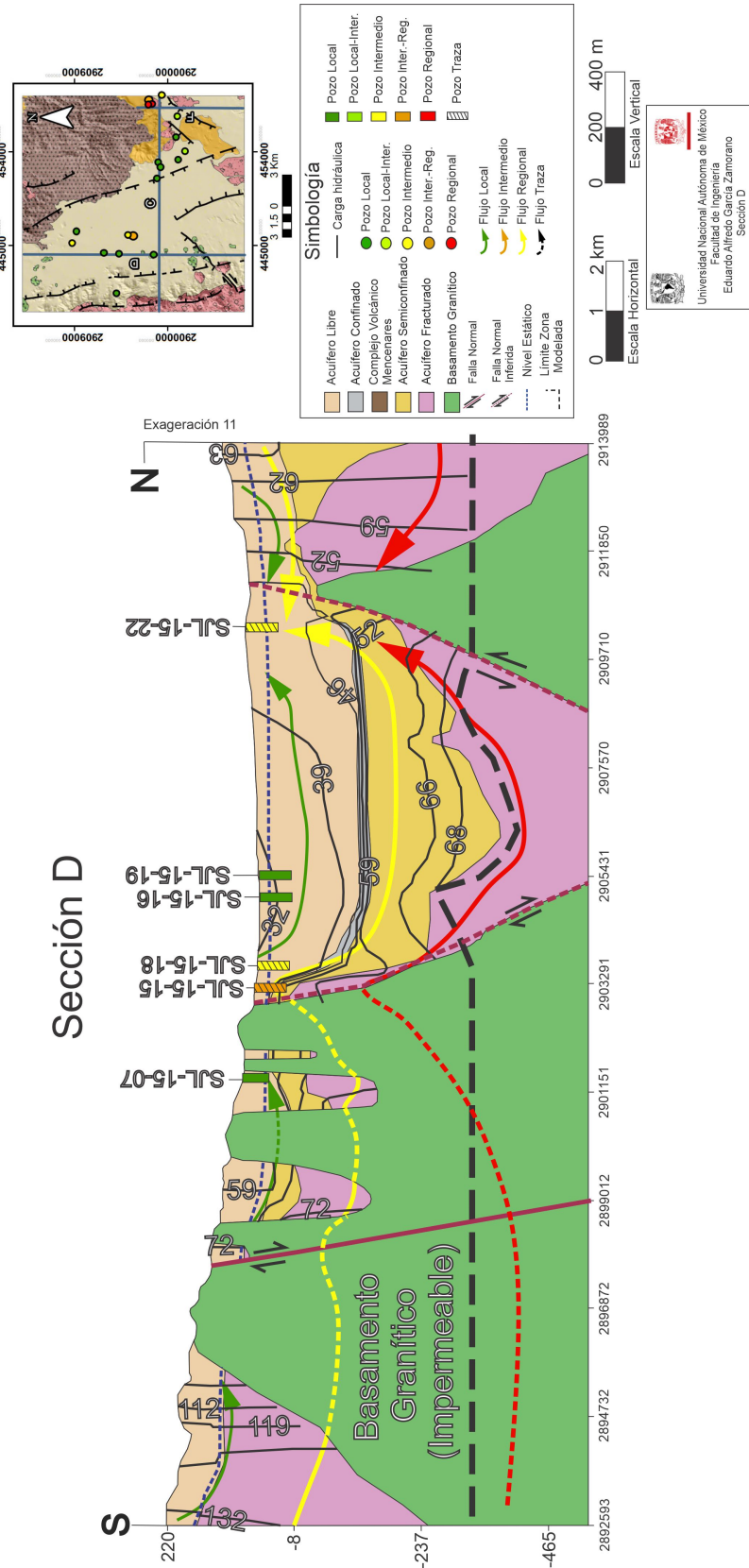


Figura 5.11: Sistemas jerárquicos del flujo subterráneo (Sección D)

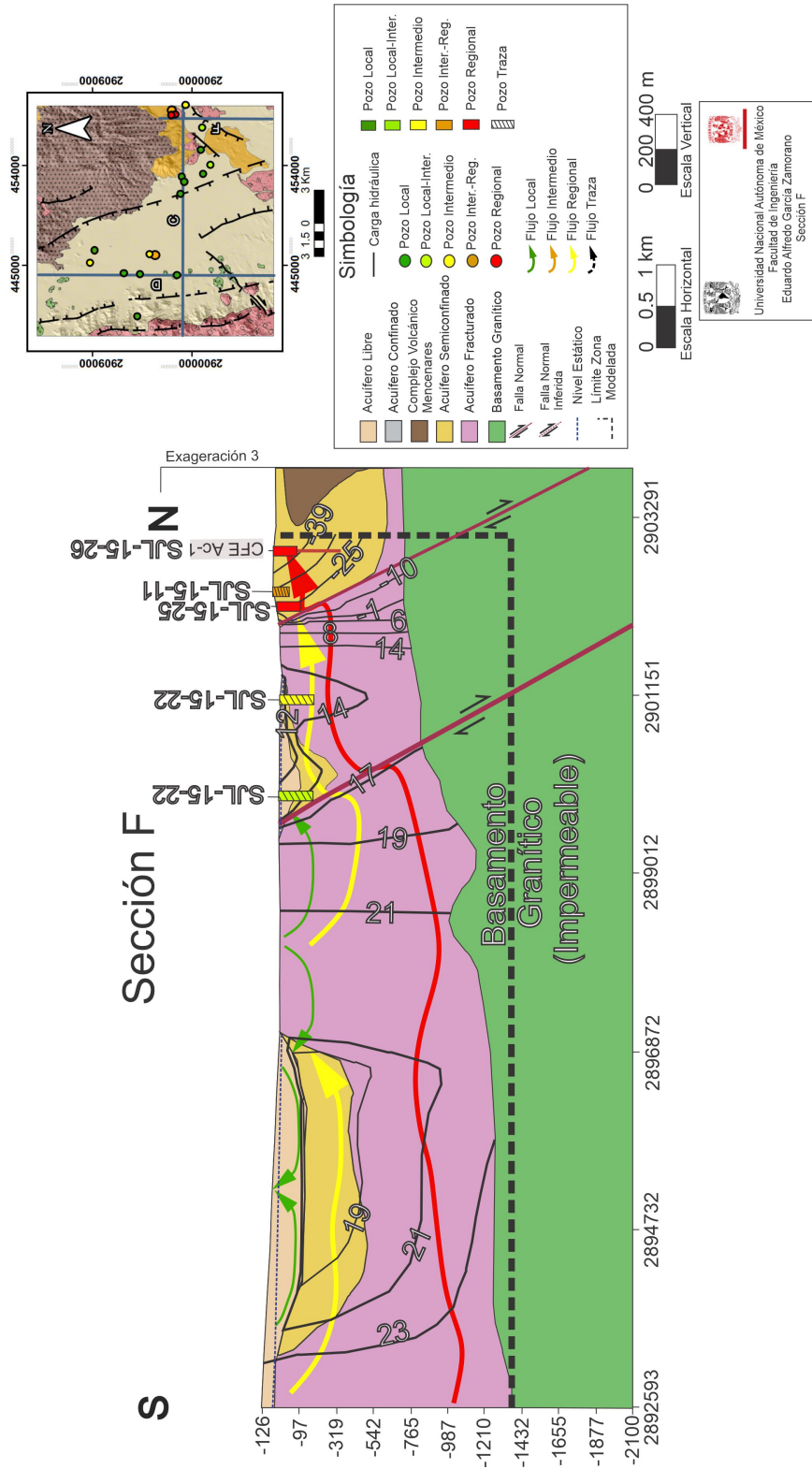


Figura 5.12: Sistemas jerárquicos del flujo subterráneo (Sección F)

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

Se implementó la herramienta del modelado para

La elaboración de los modelos numéricos son una parte esencial en hidrogeología, ya que son utilizados como herramientas que ayudan a comprender el flujo subterráneo del acuífero como su dirección, la velocidad, la jerarquización de los sistemas de flujo subterráneo, así como también la influencia de los parámetros hidráulicos.

En este trabajo se resaltó la importancia de la documentación para la construcción del modelo conceptual que aportaran información sobre las fallas principales, el tipo de estructura graben de orientación NO-SE y los contactos litológicos en superficie y a profundidad. Estudios y reportes desde perfiles de sondeo eléctrico verticales (SEV), sondeos magnetométricos, cortes litológicos, análisis de los sistemas estructurales, así como estudios estratigráficos.

Se análisis el acomodo espacial de las unidades hidroestratigráficas para construir conceptualmente el modelo hidrogeológico y poder plasmarlo en el modelo computacional.

El uso del software MOVE permitió construir el modelo conceptual con gran detalle, partiendo desde los perfiles geológicos alimentados con datos geofísicos, estructurales, estratigráficos y geológicos se logró reproducir el modelo conceptual con superficies en formato raster, las cuales representan, a etapa temprana, la base de cada Formación geológica, y en etapas finales, las bases de cada unidad hidrogeológica. MOVE permite exportar dichas superficies fácilmente al software de modelado de aguas subterráneas.

Así mismo, la implementación del software Visual Modflow Flex, permitió la simulación numérica del modelo conceptual con gran exactitud, dada su capacidad de simular el acuñamiento e interrupción de las capas.

El método implementado para la construcción del modelo conceptual prevalece para futuras consultas y reproducciones del mismo.

Para el caso del balance del Acuífero de SJBL resultaron ser las salidas mayores que las entradas desde el año de 1986 hasta la fecha. Además se determinó que a medida de que la ciudad de Loreto crezca, las descargas por extracción serán aún mayores en el valle.

Las concentraciones de sales en el valle es variada, pero que de manera general la geoquímica del agua obedece a la estructura del valle, dado que por medio de las fallas es por donde principalmente se comunica el sistema local del acuífero libre con sistemas del acuífero más profundos.

El acuífero libre es de donde se extrae el agua con fines domésticos y agrícolas. Este acuífero está constituido por materiales de reciente sedimentación y en la parte inferior del acuífero está constituido con el miembro superior de la Formación Salada, compuesta por arenisca y conglomerados con fósiles, lo que explica la permeabilidad necesaria para contener parte del acuífero libre. El acuífero confinado esta compuesto por material arcilloso perteneciente a la Formación Salada, que si bien son depósitos discontinuos en el valle, para fines de simplificación se decidió implementar una capa continua. El acuífero semiconfinado esta limitado al oeste por los rasgos estructurales del graben y esta compuesto principalmente por calcoarenitas y materiales sedimentarios de origen marino. El acuífero fracturado se extiende por toda el área de estudio y comprende un flujo de carácter intermedio-regional. Esta constituido por brechas volcánicas, rocas vulcanosedimentarias y lavas pertenecientes a la Formación Comondú.

El sistema acuífero tiene como principales zonas de recarga el sur, norte y oeste, mencionadas en orden por su importancia. El basamento granítico actúa como una barrera al flujo, lo que limita un poco el flujo del norte y del oeste. Las direcciones de flujo del sur, norte y oeste convergen en el centro del valle y tienen descarga hacia el mar, situación que con el tiempo la sobreexplotación modificó la desembocadura en San Bruno, originándose un parteaguas entre el valle y San Bruno, además de una intrusión salina cercana a la costa.

La construcción detallada del modelo numérico aporta una recopilación completa de la geología que permite una visualización y entendimiento general de la geología de la zona y de la geología regional del noroeste de México.

Las secciones del flujo y el modelo tridimensional permiten comprender los sistemas jerárquicos de flujo, además de confirmar la conexión hidráulica entre el valle y la desembocadura previa a la sobreexplotación, las direcciones de flujo, el comportamiento del flujo bajo distintas conductividades hidráulicas y las zonas de mayor explotación, tales como en la zona de cultivo, en la localidad de SJBL, al sur del Valle de SJBL, en la desembocadura de San Bruno y en las inmediaciones de la Sierra La Giganta

La modelación del flujo subterráneo para el caso de SJBL permite entender la dinámica del flujo subterráneo con la finalidad de aprovechar el recurso hídrico de manera sustentable y revertir el parteaguas hidráulico que se desarrolló por la sobreexplotación. Así mismo, ayuda a predecir la influencia de sales contaminantes al acuífero libre y evitar un riesgo potencial a la salud pública.

La simulación del modelo apegado a las características estructurales del valle confirma la importancia del sistema estructural para la existencia de yacimientos geotérmicos en la zona Agua Caliente y contribuye para un mejor entendimiento de estos.

Finalmente, el modelo creado representa una potencial herramienta para próximos estudios en el Valle de SJBL, con posibles enfoques a la hidrogeología del Valle de SJBL a futuro por medio de una simulación en estado transitorio ó desde la perspectiva de la exploración geotérmica.

6.2. Recomendaciones

Derivado de esta investigación se presentan las siguientes recomendaciones para la mayor comprensión del acuífero y la posible aplicación de estrategias para su aprovechamiento sustentable con un enfoque de seguridad del recurso y de la salud pública.

1. Se recomienda ampliar el modelo considerando toda la extensión del Acuífero de SJBL para observar el comportamiento de la batería de pozos instalada para el abastecimiento de la ciudad de Loreto.
2. Se recomienda realizar una prueba de bombeo que tenga como punto de referencia las pruebas de bombeo de los años 1986 y 2006. Esto con el fin de poder correlacionar la información a través del tiempo y poder observar la evolución del acuífero por medio de simulaciones en estado transitorio.
3. En consideración a las consecuencias por la sobreexplotación, se recomienda instalar uno o más pozos de inyección en las inmediaciones del parteaguas hidráulico para restablecer la conexión hidráulica entre el valle y la desembocadura.
4. Se recomienda realizar análisis químicos de la zona de San Bruno para monitorear la intrusión marina.
5. Tomando en cuenta la comunicación de los acuíferos por medio de las fallas normales que limitan el valle, se recomienda que la futura extracción se limite a evitar estas zonas de riesgo para evitar mezclar las huellas geoquímicas característicos de flujos más profundos con flujo locales, esto con el fin de cuidar la salud pública.
6. En consideración al acuífero fracturado, se recomienda hacer perforación exploratoria en las faldas de la Sierra La Giganta para conocer su geoquímica y con eso su posible utilidad doméstica. Esta exploración estaría fundamentada con la existencia de pozos instalados en el Acuífero de Loreto con un caudal considerable y que extraen agua del acuífero fracturado.
7. Se recomienda además realizar un estudio de campo enfocado en los sistemas estructurales y un modelo con pluma contaminante, con la finalidad

de reconocer puntos donde fluidos con concentraciones altas en sales pudieran transportarse a niveles someros. Esto como prevención al cuidado de la calidad del agua.

Bibliografía

Anderson, M. P., Woessner, W. W. 1992. Applied ground water modeling: Simulation of flow and advective transport. Academic Press. Applied ground water modeling: Simulation of flow and advective transport. Academic Press.

Arroyo M., Emiliano E. 2018. Estudio hidrogeológico de el Valle de San Juan Bautista Londó, B.C.S., a partir del análisis de datos electromagnéticos (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Atwater. 1970. Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America. Geological Society of America Bulletin, 81(12), 3513-3536.

Atwater, T., Severinghaus, J. 1989. Tectonic maps of the northeast Pacific. The Geology of North America, 15-20.

Atwater. 2011. Educational Multimedia Visualization Center: Downloads. U.C.S.B. Department of Earth Science. Recuperado de http://enve.geol.ucsb.edu/1_DownloadPage/Download_Page.html

Beal, C. H. 1948. Reconnaissance of the geology and oil possibilities of Baja California, Mexico (Vol. 31). Geological Society of America, Memoir 31, 133 pp.

Bigioggero. 1995. The Cerro Mencionares volcanic center, Baja California Sur: Source and tectonic control on postsubduction magmatism within the Gulf Rift. Geological Society of America Bulletin, 107(9), 1108-1122.

Bigioggero, B., Corona-Chávez, P., Tunesi, A. 1996. Características Estratigráficas, Petrológicas y Extinción del Cinturón Andesítico-Miocénico en la región de Loreto-Las Parras, Baja California Sur, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 13(2), 152-173.

Bohannon, R. G., Parsons, T. 1995. Tectonic implications of post-30 Ma Pacific and North American relative plate motions. Geological Society of

America Bulletin, 107(8), 937-959.

Bryan, S.E., Orozco-Esquivel, T., Ferrari, L., y López-Martínez, M. 2014. Pulling apart the mid to late Cenozoic magmatic record of the Gulf of California: Is there a Comondú arc?, Geological Society of London Special Publication 385, 389–407 pp.

Busby, C. 2004. Continental growth at convergent margins facing large ocean basins: a case study from Mesozoic convergent-margin basins of Baja California, Mexico. *Tectonophysics*, 392(1-4), 241-277.

Bustamante-García, J. 1999. Monografía Geológico-Minera de Baja California Sur. Consejo de Recursos Minerales, Pachuca, Hgo., México.

Casarrubias-Unzueta, Z, y Gómez-López, G. 1994. Estudio Geológico Regional del Proyecto Geotérmico de Bahía Concepción, B.C.S. Gerencia de Proyectos Geotermoelectricos. Subgerencia de estudios, Departamento de Exploración. Informe OGL-BC-002/94, 22 p.

Casarrubias-Unzueta, Z., y Gómez-López, G. 1994. Geología y Evaluación Geotérmica de la Zona Bahía Concepción, BCS, México. *Revista Mexicana de Geoenergía*, 10, 75-88.

Chávez-Valois, M. 1978. Estudio geológico general del área Loreto-Comondú-Bahía Concepción, Estado de Baja California Sur. IPN Tesis Licenciatura, 83 p.

Comisión Estatal del Agua. 2015. Programa Hídrico Estatal de Baja California Sur (2015-2021). Gobierno de Baja California Sur.

Comisión Federal de Electricidad. 1996. Estudio de resistividad y gravimetría en la zona, BCS, Santiago Papasquiari, DGO y Agua Caliente, BCS. Contrato CLS-GPG-3002/96. Comisión Federal de Electricidad. 1997. Propuesta para la localización de pozos de gradiente en el Centavito, Agua Caliente y Santispec, BCS. Reporte GG-CBI-019/96. Gerencia de Proyectos Geotermoelectricos Subgerencia de Estudios, Departamento de Exploración.

Comisión Federal de Electricidad. 2000. Propuesta de profundización del pozo AC-1, en la zona de agua caliente, BCS. Reporte DEX-01/2000. Gerencia de Proyectos Geotermoelectricos Subgerencia de Estudios, Departamento de Exploración.

Comisión Nacional del Agua. 2015. actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero San Juan B. Londó (0329), Estado de Baja California Sur. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General

Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos. México CDMX, 26 pp. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/102843/DR_0329.pdf.

Consejo Nacional Agropecuario. 2005. Opinión Técnica sobre el proyecto de desarrollo turístico de Fonatur en la región de Loreto, BCS.

Consejo Nacional Agropecuario. 2005. Datos Piezométricos en pozos del acuífero de San Juan B. Londó. Gerencia Estatal en Baja California Sur de la Comisión Nacional Agropecuario.

Curray, J. R., Moore, D. G., 1984. Geologic history of the mouth of the Gulf of California, In: Crouch, J. K., Bachman, S. B., (Eds), *Tectonics and sedimentation along the California margin*, 38, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section, p. 17-36.

Dickinson, W. R., WR, D. 1981. Plate tectonics and the continental margin of California.

Domenico, P.A. 1972. *Concepts and models in groundwater hydrology*. McGraw-Hill, New York. Domenic, P.A. and F.W. Schwartz. 1990. *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley y Sons, New York, 824 p. Durán-Calderón, Juana I. 2016. *Estratigrafía Regional Y Significado Tectónico del Grupo Comondú en Baja California Sur, México*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Durham, J. 1950. Cenozoic marine climates of the Pacific coast. *Geological Society of America Bulletin*, 61(11), 1243-1264.

Drake, W. 2005. *Structural analysis, stratigraphy, and geochronology of the San José Island accommodation zone, Baja California Sur, Mexico*. MSc thesis, Northern Arizona University. Engebretson, D. C. 1985. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin (Vol. 206). Geological Society of America.

Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S. 2005. Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 343-378.

Ferrari, L., López-Martínez, M., Orozco-Esquivel, M.T., Bryan, S.E., Duque-Trujillo, J., Lonsdale, P., y Solari, L., 2013. Late Oligocene to middle Miocene rifting and syn-extensional magmatism in the southwestern Sierra Madre

Occidental, Mexico: the beginning of the Gulf of California rift. *Geosphere*, v. 9, n. 5, p. 1161-1200.

Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S. E., Lopez-Martinez, M., Silva-Fragoso, A. 2018. Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift. *Earth-Science Reviews*, 183, 115-152.

Fletcher, J. M., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O., Gehrels, G. E. 2007. Ridge-trench interactions and the Neogene tectonic evolution of the Magdalena shelf and southern Gulf of California: Insights from detrital zircon U-Pb ages from the Magdalena fan and adjacent areas. *Geological Society of America Bulletin*, 119(11-12), 1313-1336.

Fondo Nacional de Fomento al Turismo. 1980. Estudio Geohidrológico de Loreto, México.

Fondo Nacional de Fomento al Turismo. 1984. Análisis del comportamiento de los acuíferos del desarrollo turístico de Loreto, BCS.

Fondo Nacional de Fomento al Turismo. 2003. Estudio geohidrológico para la perforación de nuevos pozos para la extracción de agua potable para el abastecimiento del desarrollo turístico Golden Beach, en Loreto, B.C.S.

Freeze, R. A., Cherry, J. A. (1979). *Groundwater* (No. 629.1 F7), Capitulo 2. Gastil, G., Krummenacher, D., Doupont, J., Bushee, J., Jensky, W., Barthelmy, Y. D. 1976. La zona batolítica del sur de California y el occidente de México. *Bol. Soc. Geolo. Mex.*, 37, 2, 84-90.

Gastil, G., Krummenacher, D., Minch, J. 1979. The record of Cenozoic volcanism around the Gulf of California. *Geological Society of America Bulletin*, 90(9), 839-857.

Hausback, B. P. 1984. Cenozoic volcanic and tectonic evolution of Baja California Sur, Mexico.

Heim, A. 1922. Notes on the Tertiary of southern Lower California. *Geol. Mag.* 59, 00.529-547.

Ingebristen, S., Sanford, W. E., Neuzil, E. C. 2006. *Water in Geologic Processes*. Segunda Edición, Reino Unido. Cambridge University, press, 564 p.

Instituto de Geofísica. 1986. Estudio Geohidrológico-Geofísico en la cuenca

de San Juan Bautista Londó, Municipio Comondú, Reporte para SARH, México: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, México.

Ledesma-Vázquez, J., Johnson, M. E. 2001. Miocene–Pleistocene tectono-sedimentary evolution of Bahía Concepción region, Baja California Sur (Mexico). *Sedimentary Geology*, 144(1-2), 83-96.

Ledesma-Vázquez, J. 2002. A gap in the Pliocene invasion of seawater to the Gulf of California. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19(3), 145-151.

Lesser y Asociados S.A. de C.V. 2006. Actualización geohidrogeológica en los acuíferos de San Juan B. Londó y Loreto, en el estado de Baja California Sur. Lonsdale, P. 1991. Structural Patterns of the Pacific Floor Offshore of Peninsular California: Chapter 7: Part III. Regional Geophysics and Geology.

Mammerickx, J., Klitgord, K. D. 1982. Northern East Pacific Rise: Evolution from 25 my BP to the present. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 87(B8), 6751-6759.

Maraver-Romero, D.A., Aguilera -Hale, J.C., Sevilla-Unda, V.E., Meléndez-Rodríguez, A. 1997. Carta Geológica Minera Loreto G-12-5, Esc. 1:250 000. Consejo de Recursos Minerales. Hoja explicativa de carta.

Mayer, L., Vincent, K. R. 1999. Active tectonics of the Loreto area, Baja California Sur, Mexico. *Geomorphology*, 27(3-4), 243-255.

McFall, C. C., 1968, Reconnaissance geology of the Concepcion Bay area, Baja California, Mexico: Stanford University Publications in Geological Sciences, v. 10, p. 1-25.

McLean, H., Hausback, B.P., Knap, J.H. 1987. The geology of west-central Baja California Sur, Mexico. *U.S. Geol. Surv. Bull.* 1579, pp. 1-16.

McLean, H., 1988, Reconnaissance geologic map of the Loreto and part of the San Javier quadrangles, Baja California Sur, Mexico. US Geological Survey Misc. Field Study Map, MF-2000, 1: 50 000.

Mina, F. 1957. Bosquejo geológico del Territorio Sur de la Baja California. *Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, Boletín.* 9, pp. 139-270.

Morris, D.A., y Johnson, A. I. 1967. Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed by the hydrologic laboratory of the US Geological Survey, 1948-60 (No. 1839-D). US Government Printing Office.

Noble, J.A., 1950, Manganese on Punta Concepción, Baja California, México: *Economic Geology*, 45, 771-785.

Rodríguez-Díaz, A. A. 2009. Metalogenia del Área Mineralizada en Manganeso de Bahía Concepción, Baja California Sur (Tesis de maestría), 42-65 pp. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Sawlan, M. G., Smith, J. G. 1984. Petrologic characteristics, age and tectonic setting of Neogene volcanic rocks in northern Baja California Sur, Mexico.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1978. Informe final del estudio geohidrológico preliminar de San Juan B. Londó Municipio de Comondú, Estado de Baja California Sur.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1981. actualización del Estudio Geohidrológico de la cuenca de Loreto-Puerto Escondido, municipio de Comondú, en el Estado de Baja California Sur.

Servicio Geológico Minero. 2016. Santa Rosa, G12-A778. Escala 1:50 000, Baja California Sur. Subdirección de Geología. Gerencia de Geología y Geoquímica. Gerencia Regional Occidente.

Servicio Meteorológico Nacional. 2017. Reporte del clima en México. Reporte anual 2017, 13, 48 pp. Consultado en Mayo 2020. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2017.pdf>

Harvard University. 2005. Futuros alternativos para la región de Loreto, Baja California Sur, México. Informe Técnico.

Stock, J. M., Hodges, K. V. 1989. Pre-Pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific plate. *Tectonics*, 8(1), 99-115.

Todd, V. R., Erskine and Morton, D. M., 1988, Metamorphic and tectonic evolution of the northern peninsular ranges batholith, southern California, Metamorphic and crustal evolution of the western United States, Rubey, W. G. Ernst, Prentice Hall, v. 7, p. 894-937.

Tóth J. 1963, A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins", *Journal in geophysical research*, volume 68 NO. 16, pp 4795-4811.
Umhoefer, P. J., Dorsey, R. J., Willsey, S., Mayer, L., Renne, P. 2001. Stratigraphy and geochronology of the Comondu Group near Loreto, Baja California Sur, Mexico. *Sedimentary Geology*, 144(1-2), 125-147.

Valencia-Moreno, M., Ortega Rivera, M. A. 2011. Cretácico Tardío-Eoceno Medio en el noroeste de México—evolución del arco magmático continental y su contexto geodinámico (orogenia Laramide). Boletín del Instituto de Geología. UNAM, (118).

Walawender, M. J., Hanan, B. B. 1991. Geological excursions in southern California and Mexico (pp. 297-312). Department of Geological Sciences, San Diego State University.

Wang, H. F.. 1982. Introduction to Groundwater Modelling: Finite Differences and Finite Elements Methods. Reino Unido. Academic press, 237 p.

Zanchi, A. 1994. The opening of the Gulf of California near Loreto, Baja California, Mexico: from basin and range extension to transtensional tectonics. Journal of Structural Geology, 16(12), 1619-1639.