



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Caracterización
hidrogeológica del Graben de
Juchipila e implicaciones
geotérmicas**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

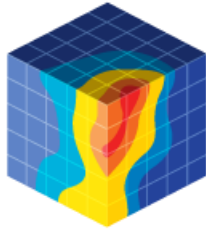
Alberto Paz Pérez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Antonio Hernández Espriú



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



The
HYDRO
geology
Group
FACULTY OF ENGINEERING
U N A M



CONTRIBUCIÓN DEL GRUPO DE HIDROGEOLOGÍA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

Este documento representa la Tesis No. 26 del Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería (UNAM) como parte de su contribución científica y de formación de recursos humanos especializados en la evaluación cuantitativa de acuíferos.

This bachelor's dissertation represents the Thesis No. 26 of the Hydrogeology Group, Faculty of Engineering (UNAM) as part of our scientific contribution and human resources development in quantitative groundwater hydrology.

<http://www.ingenieria.unam.mx/hydrogeology/>

Twitter: @hydrogeologymx

Agradecimientos del proyecto

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM: IV100117 “Energía no convencional en México: Un estudio interdisciplinario en la parte suroriental de la Sierra Madre Occidental”. Agradezco a la DGAPA – UNAM la beca recibida durante el periodo del 1° de febrero al 30 de junio de 2018.

El mapa geológico, la columna estratigráfica y los fechamientos presentados en este trabajo, se elaboraron como parte de la tesis de maestría de la Lic. Vanesa Martínez Reséndiz dirigida por el Dr. Luca Ferrari y de la tesis de licenciatura de Beatriz Beltrán Martínez dirigida por el Dr. Isidro Loza Aguirre.

Se agradece al Dr. Fernando Corbo Camargo, Oscar Ávila, Cristian O. Vargas, Héctor Romo y Félix Rivera por la adquisición y procesamiento de los datos magnetotelúricos empleados en este trabajo.

Agradezco también al Lic. Sergio E. Macías Medrano por los datos facilitados del modelo digital de elevación del área de estudio y al Ing. Alberto Arias Paz por sus interpretaciones y resultados de las pruebas de bombeo efectuadas por

BETSCO en 2005.

Agradecimientos personales

A mi madre Gloria Pérez, mi tío Enrique Pérez y mi abuela Josefina Rojas que a lo largo de toda mi vida me han respaldado, motivado y aconsejado.

Gracias por cada día confiar y creer en mí y mis expectativas.

Son ustedes mi mayor inspiración y orgullo.

A mi director de tesis, Dr. José Antonio Hernández, al Ing. Alberto Arias, y al Lic. Sergio Macías, cuyo apoyo y sabiduría me permitió aprender, crecer como estudiante, como ingeniero y como ser humano.

A Nallely Reza, por ser durante el cambio de estilo de vida, mi bastión y mi fortaleza.

Amiga y compañera incondicional sin la que la misión habría sido imposible.

Gracias Alana y Enrique por compartir y alcanzar los objetivos del proyecto.

Gracias Santiago, Marcos, Katya, Yael y Fernanda, por la amistad fiel e incondicional que me brindaron, y el apoyo académico complementario que me aportaron.

A la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Nacional Autónoma de México, agradezco enormemente por la formación que nos ha brindado, las experiencias que he vivido y por todas las amistades que con mis compañeros y maestros he forjado.

La mejor versión de mí, la he logrado por todos ustedes.

Alberto Paz Pérez

Dedicatoria

Esta tesis es un obsequio para mi mamá; Gloria Pérez Rojas y para mi abuela; Josefina Rojas Vázquez, pues todo lo que hasta ahora he tenido a bien lograr, ha sido gracias a ustedes. Mis virtudes e incluso mis defectos, forman parte del legado de amor y educación que me han brindado.

Aprecio sobremanera los años de lucha y esfuerzo constante que han enfrentado para poder ofrecerme la oportunidad de alcanzar mis objetivos en la mejor institución educativa de nuestro país, mi alma mater, la Universidad Nacional Autónoma de México.

Les garantizo plenamente que nada será en vano, haré cuanto de mí dependa para aplicar mis conocimientos en beneficio de la sociedad y de mi país, y con consciencia plena del cuidado del medio ambiente.

Resumen

A lo largo de su existencia, el acuífero Jalpa – Juchipila, emplazado dentro del Graben de Juchipila, ha presentado diversas anomalías térmicas de baja entalpía, dichas anomalías no pueden ser justificadas por vulcanismo, debido a que el último registro de actividad magmática es de hace aproximadamente 10 [Ma] tal y como acusan los afloramientos de basalto localizados al interior del graben. La actividad hidrotermal en la región apunta entonces, a la presencia de sistemas geotérmicos no convencionales, dadas las condiciones de vulcanismo y tectonismo inactivo de la zona y a las litologías cuyas rocas contienen cantidades importantes de elementos inestables. La caracterización hidrogeológica del acuífero ha permitido demostrar la existencia de al menos 2 unidades hidrogeológicas, una granular y libre, en donde los fluidos meteóricos se almacenan directamente, y otra fracturada, misma que se recarga desde los hombros del graben, y la cual, dada su condición de semiconfinamiento en algunas partes, es en donde se desarrolla el sistema geotérmico por decaimiento radioactivo. En este trabajo de investigación se presentan evidencias que apoyan esta hipótesis y que contribuyen un poco a la comprensión del tópico.

Abstract

Throughout its existence, the Jalpa - Juchipila aquifer, located within the Graben de Juchipila, has presented various thermal anomalies of low enthalpy, these anomalies cannot be justified by volcanism, because the last record of magmatic activity is of approximately 10 [Ma] as the basalt outcrops located inside the graben. Hydrothermal activity in the region then points to the presence of non-conventional geothermal systems, given the conditions of inactive volcanism and tectonism in the area and lithologies whose rocks contain significant quantities of unstable elements. The hydrogeological characterization of the aquifer has demonstrated the existence of at least 2 hydrogeological units, one granular and free, where the meteoric fluids are stored directly, and another fractured, which is recharged from the shoulders of the graben, and which, given its condition of leaky aquifer in some parts, is where the geothermal system is developed by radioactive decay. In this research I present evidence that supports this hypothesis and that contribute a little to the understanding of the topic.

Índice general

Índice de figuras	9
Índice de tablas.....	11
1. Introducción.....	12
2. Zona de estudio	15
2.1 Geología regional y tectónica	15
Génesis.....	16
Afloramientos	19
Mapa geológico regional.....	23
Columna estratigráfica regional	24
2.2 Hidrología de superficie.....	25
Climatología.....	26
2.3 Hidrología subterránea.....	28
Tipo de acuífero.....	28
Revisión de usos de agua subterránea.....	28
3. Métodos	31
3.1 Revisión de información existente.....	31
Revisión de hidrogeología y cartografía de CONAGUA.....	31
3.2 Configuración piezométrica del acuífero.....	32
3.3 Estimación de parámetros hidráulicos.....	36
Pruebas de bombeo.....	36
Configuración espacial de T.....	39
3.4 Correlación geológico-geofísica	39
Modelos 1D	40
Modelos 2D	40
3.5 Temperatura del agua subterránea	41
4. Resultados y discusión.....	42
4.1 Configuración piezométrica.....	42
Estudios previos	42
Primera etapa – Jun 2017.....	44
Segunda etapa – Dic 2017.....	46
Tercera etapa – Jun 2018	48
4.2 Parámetros hidráulicos	50

Interpretación de pruebas de bombeo	50
4.3 Geofísica	62
4.4 Temperatura.....	82
4.5 Resumen de modelo conceptual de flujo de agua subterránea	83
Sección conceptual.....	87
5. Conclusiones	88
Referencias citadas	89
Apéndices	94

Índice de figuras

Fig. 1.1. Localización geográfica del área de estudio en mapa de altitudes.	14
Fig. 2.1. Mapa índice.	15
Fig. 2.2. Mapa tectónico.	18
Fig. 2.3. Mapa geológico regional.	23
Fig. 2.4. Columna estratigráfica regional.	24
Fig. 2.5. Temperaturas máx. Y mín. promedio en la región de Jalpa, 2009 – 2019.	27
Fig. 2.6 - Precipitaciones anuales promedio en la región del AJJ, 2012 – 2017.	27
Fig. 2.7. Evaporación potencial media anual [mm] en la región del AJJ, 2012 – 2017.	27
Fig. 2.8. Tipo de aprovechamientos en el AJJ en 2018.	29
Fig. 2.9. Estatus de aprovechamientos en el AJJ en 2018.	29
Fig. 2.10. Uso de aprovechamientos en el AJJ en 2018.	30
Fig. 2.11. Uso del volumen de extracción en el AJJ en 2018.	30
Fig. 3.1. Medición de nivel estático y toma de muestras.	35
Fig. 3.2. Localización de los pozos con prueba de bombeo.	37
Fig. 3.3. Relaciones teóricas tiempo-abatimiento.	38
Fig. 3.4. Medidor multiparamétrico.	41
Fig. 3.5. Mediciones en campo con medidor multiparamétrico.	41
Fig. 4.1. Carga hidráulica configurada por Lesser (Jul 2004).	43
Fig. 4.2. Carga hidráulica configurada por autor (Jun 2017).	45
Fig. 4.3. Carga hidráulica configurada por autor (Dic 2017).	47
Fig. 4.4. Carga hidráulica definitiva elaborada por autor (Jun 2018).	49
Fig. 4.5. Prueba de bombeo del pozo Agua Blanca (BETSCO, 2005).	52
Fig. 4.6. Prueba de bombeo del pozo El Caracol (BETSCO, 2005).	53
Fig. 4.7. Prueba de bombeo del pozo El Rodeo (BETSCO, 2005).	54
Fig. 4.8. Prueba de bombeo del pozo Juchipila (BETSCO, 2005).	55
Fig. 4.9. Prueba de bombeo del pozo Rancho Zapotito (BETSCO, 2005).	56
Fig. 4.10. Resultados gráficos de interpretaciones de pruebas de bombeo de BETSCO (2005).	57
Fig. 4.11. Interpretación y resultados de prueba de bombeo de BETSCO del pozo Agua Blanca (CNA-B-291), con AQTESOLV Pro.	58
Fig. 4.12. Interpretación y resultados de prueba de bombeo de BETSCO del pozo El Rodeo (CNA-B-189) con AQTESOLV Pro.	59
Fig. 4.13. Interpretación y resultados de prueba de bombeo de BETSCO del pozo Rancho Zapotito (CNA-B-30) con AQTESOLV Pro.	59
Fig. 4.14. Interpretación y resultados de prueba de bombeo de BETSCO del pozo El Caracol (CNA-B-114) con AQTESOLV Pro.	60
Fig. 4.15. Interpretación y resultados de prueba de bombeo de BETSCO del pozo Juchipila (CNA-B-315) con AQTESOLV Pro.	60
Fig. 4.16. Plano de localización de sondeos MT y perfiles geoeléctricos.	62

Fig. 4.17. Correlación del sondeo MT 1.5.	63
Fig. 4.18. Correlación del sondeo MT 1.7.	64
Fig. 4.19. Correlación del sondeo MT 1.8.	65
Fig. 4.20. Correlación del sondeo MT 2.5.	66
Fig. 4.21. Correlación del sondeo MT 2.6.	67
Fig. 4.22. Correlación del sondeo MT 3.4.	68
Fig. 4.23. Correlación del sondeo MT 3.5.	69
Fig. 4.24. Correlación del sondeo MT 3.6.	70
Fig. 4.25. Correlación del sondeo MT 4.4.	71
Fig. 4.26. Correlación del sondeo MT 4.5.	72
Fig. 4.27. Correlación del sondeo MT 4.6.	73
Fig. 4.28. Tendencia de la resistividad en función de la temperatura.	75
Fig. 4.29. Perfil geoelectrico 02.	76
Fig. 4.30. Interpretación geológica de perfil geoelectrico 02.	77
Fig. 4.31. Perfil geoelectrico 03.	78
Fig. 4.32. Interpretación geológica de perfil geoelectrico 03.	79
Fig. 4.33. Perfil geoelectrico 04.	80
Fig. 4.34. Interpretación geológica de perfil geoelectrico 04.	81
Fig. 4.35. Sección conceptual.	87

Índice de tablas

Tabla 3.1. Descripción de campos considerados en las bases de datos del proyecto.	32
Tabla 3.2. Resumen de aprovechamientos disponibles en bibliografía.	33
Tabla 3.3. Resumen de aprovechamientos disponibles (Jun 2017).	33
Tabla 3.4. Resumen de aprovechamientos disponibles (Dic 2017).	34
Tabla 3.5. Resumen de aprovechamientos disponibles (Jun 2018).	35
Tabla 4.1. Resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo de BETSCO por el método de Cooper-Jacob. BETSCO (2005).	50
Tabla 4.2. Resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo de BETSCO por diversos métodos. Facultad de Ingeniería, UNAM. (2017).	51
Tabla 4.3. Interpretación realizada por el autor, de las pruebas de bombeo de BETSCO por el método de Cooper-Jacob.	58
Tabla 4.4. Interpretación realizada por el autor, de las pruebas de bombeo de BETSCO por diversos métodos con AQTESOLV Pro.	61
Tabla 4.5. Comparación entre resultados de transmisividad de pruebas de bombeo BETSCO (2015).	61
Tabla 4.6. Resultados de correlaciones de modelos 1D.	74
Tabla 4.7. Concentrado de aprovechamientos y sus resistividades promedio.	74
Tabla. 4.8. Descripción de unidades geoelectricas de perfil 02.	76
Tabla. 4.9. Descripción de unidades geoelectricas de perfil 03.	78
Tabla. 4.10. Descripción de unidades geoelectricas de perfil 04.	80
Tabla 7.1. Base de datos general del proyecto	95

1. Introducción

A una escala global, las investigaciones en torno al agua subterránea adquieren cada vez una mayor relevancia, su temperatura es uno de los parámetros cuyo estudio sin duda es de gran importancia pues impacta de forma directa en términos de los usos industriales que se le puede dar al agua, en especial a la generación de energía, la refrigeración y en ocasiones también en la agricultura ya que el riego es una defensa contra las heladas.

La temperatura de las aguas subterráneas varía poco, de hecho, mientras mayor es la profundidad del acuífero esta suele ser más constante. En la edad contemporánea, las aguas termales han generado un creciente interés, ya que son una fuente de energía de bajo costo para producción de energía eléctrica y calefacción doméstica e industrial. La prospección geotérmica es un campo paralelo al de la hidrología subterránea.

La mayoría de las plantas de energía geotérmica que operan en el mundo producen electricidad en entornos donde las fallas transectan gran parte de la litosfera o donde ocurren las cámaras de magma. Las fallas profundas y el volcanismo activo caracterizan los márgenes tectónicos de la placa activa. Comprender los procesos de tectonismo activo a diferentes escalas puede ser crucial para caracterizar los recursos geotérmicos de alta entalpía dominados por convección. En los sistemas geotérmicos de baja entalpía, dominados por la conducción, es crucial entender la evolución geodinámica completa, en particular el papel de las fallas y fracturas en el campo de estrés actual y el tipo de procesos que intervienen en la generación de calor (Moeck, 2014). Generalmente, este tipo de sistemas son identificados como no convencionales.

Para Custodio y Llamas, el agua de lluvia que recarga los acuíferos tiene una temperatura algo inferior a la temperatura ambiente. Una vez que el agua se infiltra en el

terreno, intercambia calor con el mismo. En este proceso el elevado calor específico del agua (1 [cal/g]) frente al terreno seco (alrededor de 0.2 [cal/g]) juega un papel muy importante, ya que actúa como regulador de la temperatura. Según estos autores, el terreno recibe calor solar y calor interno, pero también enuncian algunas contribuciones menores muy poco importantes para ellos, tal es el caso de la desintegración de sustancias radioactivas (Custodio and Llamas, 2001).

Los acuíferos emplazados en grábenes han sido limitadamente estudiados en el mundo. Algunos de los más destacados ejemplos son los acuíferos de los grábenes de Barwon Downs en Victoria, Australia (Petrides and Cartwright, 2006), y el de Urema en Mozambique (Chirindja *et al.*, 2016), en los cuales, destacan la presencia de unidades litológicas constituidas por sedimentos volcánicos, areniscas y rocas ígneas. A pesar del exhaustivo análisis hidrogeológico, no definen las posibles fuentes de las temperaturas presentes en el agua.

El decaimiento radioactivo de las rocas ígneas ácidas con altas concentraciones de K, Th y U, entre las que destacan: granitos, riolitas e ignimbritas, genera sistemas geotérmicos de baja entalpía (Morales-Arredondo *et al.*, 2016).

La influencia que el decaimiento radiactivo tiene en las temperaturas de la litósfera, ha quedado demostrada en investigaciones recientes en las cuales, la producción de calor promedio se encuentra en el rango de 1.5 [$\mu\text{W}/\text{m}^3$] a 1.67 [$\mu\text{W}/\text{m}^3$] (Hasterok and Webb, 2017), sin embargo, la relación que guardan las variaciones reales de temperatura del acuífero con los procesos de decaimiento radioactivo no está completamente definida. Por consiguiente, este trabajo de investigación contribuye parcialmente al análisis de dichas anomalías geotérmicas que presenta el agua en función de las litologías con las cuales interactúa dentro del área de estudio que se muestra en la Fig. 1.1.

Mediante el análisis hidrogeológico del Acuífero Jalpa – Juchipila (AJJ), es posible analizar dichas variaciones geotérmicas, pues este se encuentra enclavado dentro de un graben cuya litología comprende rocas con minerales que presentan una tasa importante de decaimiento radioactivo, y por el momento, no se tiene alguna fuente magmática detectada que justifique las altas temperaturas que presenta el agua en algunas secciones; por lo tanto, este trabajo de investigación tiene como objetivo fundamental efectuar la caracterización hidrogeológica del Graben de Juchipila (GJ) para poder determinar la posible relación que guardan las anomalías geotérmicas con respecto a las litologías presentes en el mismo, particularmente con las ignimbritas. El GJ se localiza entre las coordenadas 20.983° y 22.667° de latitud y -102.667° y -103.416° de longitud, presenta un rumbo NE-SW y se ubica en la parte sureste del estado de Zacatecas. Pertenece a la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental y limita con la Sierra de Nochistlán al este y la Sierra de Morones al oeste. Comprende los municipios de Apozol, Huanusco, Jalpa, Juchipila, Moyahua de Estrada y Tabasco.

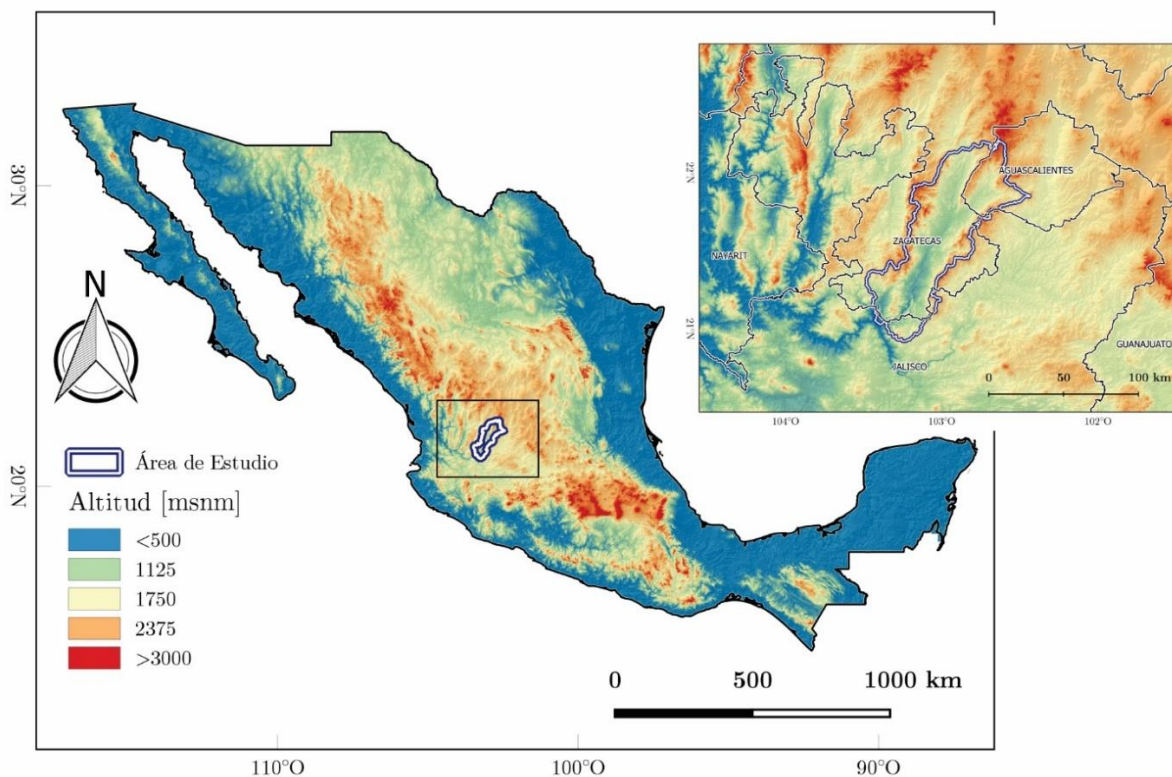


Fig. 1.1. Localización geográfica del área de estudio en mapa de altitudes.

2. Zona de estudio

2.1 Geología regional y tectónica

En el noroeste de México, a lo largo de 1200 [km] desde la parte central de Jalisco en sus límites con la Faja Volcánica Transmexicana, hasta los estados de Arizona, Nuevo México y Texas, se extiende la Sierra Madre Occidental (SMO). Esta se encuentra formada por rocas volcánicas de edad Cretácico – Cenozoico y tiene un área de cerca de 300,000 [km²]. Con un volumen de roca mínimo estimado de aproximadamente 400,000 [km³], la SMO (Fig. 2.1) es considerada como la provincia de ignimbrita continua más grande del mundo y su origen es atribuido un régimen tectónico extensional. (Aguirre-Díaz et al., 2008)

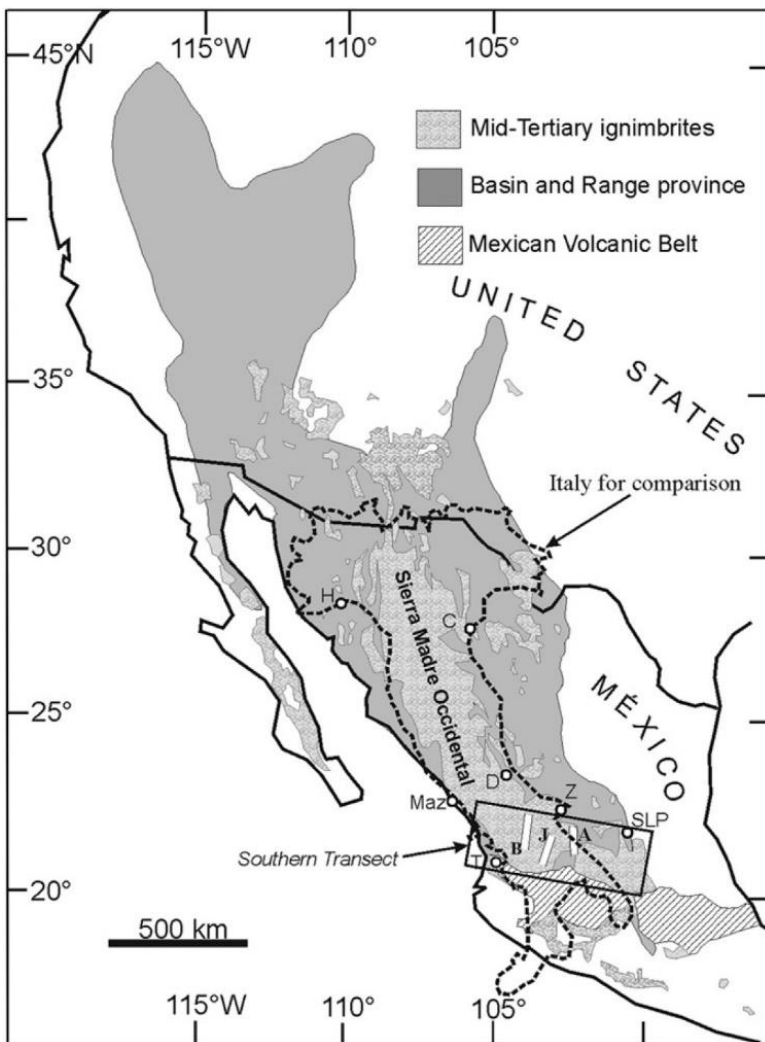


Fig. 2.1. Mapa índice. La provincia volcánica (SMO), la provincia tectónica extensional de Basin and Range, y las ignimbritas del Medio Terciario en México y el suroeste de los Estados Unidos. Se superpone un esquema de Italia para la comparación de escalas. B, Graben Bolaños; J, Graben Juchipila; A, Graben Aguascalientes. Ciudades: H, Hermosillo; C, Chihuahua; Maz, Mazatlán; D, Durango; T, Tepic; Z, Zacatecas; SLP, San Luis Potosí. Modificado de Aguirre-Díaz *et al.*, 2008.

Génesis

La extensión en arcos volcánicos continentales generalmente es originada tanto por la competencia entre las fuerzas del cuerpo litosférico como las relacionadas con los efectos gravitacionales y térmicos del magmatismo (e.g., Gans et al., 1989), y las fuerzas de límites de placa, relacionadas con los vectores de movimiento relativos entre placas de subducción y placas principales o la interacción directa entre divergentes oceánicos y placas continentales. (e.g., Bohannon and Parsons, 1995).

El magmatismo puede inducir a la extensión cortical de dos maneras: 1) la inyección de magmas máficos en la base de la corteza puede provocar la deformación de la litosfera debido a la acumulación de material caliente de baja densidad; 2) el rápido apilamiento de las rocas volcánicas en la superficie puede construir una región topográficamente elevada donde la tensión litostática vertical puede exceder al estrés horizontal regional. Sin embargo, en ambos casos, es probable que la extensión afecte solo la parte superior de la corteza. El estilo de la tectónica y el volcanismo y la distribución de las fallas están controlados por la estructura interna de los bloques de la corteza y por los efectos gravitacionales y térmicos del magmatismo. (Nieto-Samaniego et al., 1999).

La disminución del ángulo de subducción y la velocidad de la convergencia entre la placa Norteamericana y la placa de Farallón corresponden con los eventos volcánicos que se desarrollaron durante el Eoceno, hace 43 y 39 [Ma] durante el Oligoceno – Mioceno, a pesar de que la placa Norteamericana y la del Pacífico ya habían entrado en contacto directo, la placa de Farallón continuó subduciendo. A causa de un posible desprendimiento de la parte más profunda de la placa de Farallón, un flujo de material astenosférico se originó, y este, junto con los esfuerzos de los límites de placas, generó varios pulsos ignimbríticos en el sur de la SMO (Ferrari, Valencia-Moreno and Bryan, 2007).

La SMO ha albergado la producción de enormes volúmenes de ignimbrita, esto se ha asociado con las ventilas fisurales vinculadas a los sistemas de fallas regionales que dieron lugar a la provincia Basin and Range. Se han evidenciado numerosos registros que dan cuenta de la presencia de estructuras de colapso explosivo volcánico-tectónico que Aguirre-Díaz et al., (2008) proponen denominarlas “calderas de graben” dichas estructuras implican la existencia de cámaras de magma de caldera sub-graben cuyo origen es atribuido al régimen tectónico extensional, en este caso el régimen extensional de Basin and Range (Aguirre-Díaz et al., 2008).

El GJ se localiza al sur de la SMO, data del Oligoceno, se comenzó a formar entre ~29 y 23 [Ma] (Ferrari *et al.*, 2018). Tiene una dirección NNE – SSW y en la porción NNE se ramifica convirtiéndose en el graben de Calvillo. Las sierras de Morones y de Nochistlán representan sus límites longitudinales y constituyen sus pilares tectónicos. En su interior se presentan basculamientos en algunos depósitos del relleno sedimentario, y en sus hombros se han identificado fallas de ángulo alto con desplazamiento dominante de tipo normal y cuya dirección preferencial se dirige al N10°E (Nieto-Samaniego, Alaniz-Alvarez and Labarthe-Hernández, 1997).

El estilo de la tectónica y el volcanismo y la distribución de las fallas (Fig. 2.2) están controlados por la estructura interna de los bloques de la corteza y por los efectos gravitacionales y térmicos del magmatismo. (Nieto-Samaniego et al., 1999).

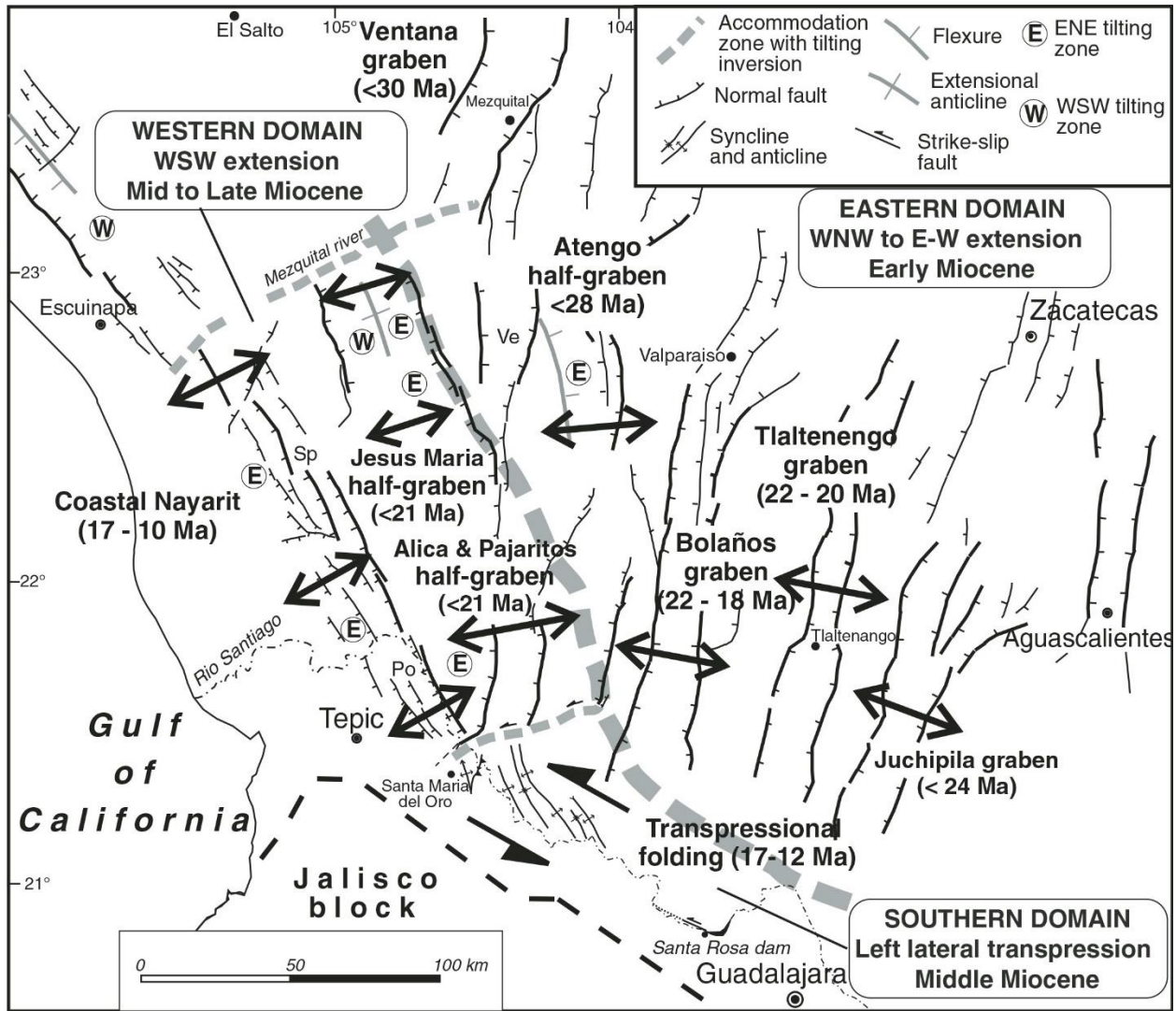


Fig. 2.2. Mapa tectónico. Muestra las estructuras de graben en la porción centro y sur de la SMO, con información de direcciones de deformación extensional y edades. Modificado de Ferrari, Valencia-Moreno and Bryan, 2007.

Afloramientos

Basamento Pre – volcánico

La SMO surgió a partir de un basamento compuesto por granitos, gneises y esquistos de edades Paleoproterozoico y Mesoproterozoico y forma parte del cratón de Norteamérica. Una porción de este se desplazó hacia el sureste de Sonora durante el Jurásico Medio y Tardío por la mega cizalla Mojave – Sonora (Anderson and Silver, 1979).

Algunas secuencias sedimentarias marinas, metamórficas de grado bajo y volcanoclásticas que afloran en el norte de la SMO, se encuentran cubriendo a las rocas cristalinas del Proterozoico, esto principalmente en los estados de Sonora y Coahuila. De estas; las de origen sedimentario se formaron como parte de dos ambientes geológicos: uno de cuenca profunda y otro de plataforma somera. Por otra parte, las secuencias metamórficas y volcánicas están vinculadas a los remanentes de la acreción de Gondwana y Laurentia a comienzos del periodo pérmico y pertenecen al bloque Coahuila (McKee, Jones and Anderson, 1988).

El Grupo Barranca se formó durante el Mesozoico al oeste de la SMO (de Cserna, 1961) y se compone de secuencias sedimentarias clásticas, continentales y marinas desarrolladas durante el periodo Triásico Tardío y Jurásico Temprano. Rocas sedimentarias marinas de edad similar también han sido reportadas, conocidas como el Grupo Antimonio (Estep, Lucas and González-León, 1997), el cual está sobreyacido por rocas sedimentarias clásticas intercaladas con rocas volcánicas, interpretadas como los productos de un arco continental desarrollado en el Jurásico. Después, sobreyace discordante el Grupo Bisbee el cual consiste en secuencias fluvio – deltaicas marinas de finales del Jurásico y principios del Cretácico; a finales de este se desarrollaron cuencas sintectónicas en el noreste de Sonora las cuales se asocian a la Orogenia Laramide en las cuales se acumularon sedimentos fluviales y lacustres, conocidos como el Grupo Cabullona (Ferrari, Valencia-Moreno and Bryan, 2007).

Complejo Volcánico Inferior

La Orogenia Laramide dominó la actividad volcánica en el norte de México durante el Cretácico Tardío y a principios del Cenozoico, esto favoreció la creación de un arco magmático que formó parte del Complejo Volcánico Inferior. Este se compone de batolitos que varían en su composición de diorita a granito alcalino y lavas andesíticas con tobas riolíticas y dacíticas (Ferrari, Valencia-Moreno and Bryan, 2007) subyacentes por areniscas y lutitas de la Formación Tarahumara. Hacia el centro y sur de la SMO se encuentran batolitos de composición diorítica y granodiorítica lavas andesíticas y dacíticas e ignimbritas, las cuales se encuentran intrusando rocas sedimentarias marinas del Cretácico.

Rocas ígneas del Eoceno

En la región norte, estas se manifiestan por ignimbritas, lavas dacíticas y andesíticas (Ferrari, Valencia-Moreno and Bryan, 2007); lavas riolíticas y andesíticas con intrusiones dioríticas debajo de una sucesión fluvial- lacustre de conglomerados, areniscas y lutitas en la porción central, e ignimbritas silíceas, domos riolíticos y lavas andesíticas cubiertas por arenisca y conglomerado con clastos de andesita en la zona sur.

Grupo Volcánico Superior

Este grupo se ubica de forma discordante sobre las rocas del Eoceno. Está compuesto por una secuencia de ignimbritas riolíticas, depósitos volcánicos de caída, lavas intermedias y silíceas y en menor cantidad de lavas máficas. En el norte de la SMO presenta ignimbritas riolíticas intercaladas con dacitas, riolitas y lavas basálticas con un rango de edad del Oligoceno al Plioceno; en el sector central existen secuencias ignimbríticas, domos riolíticos y lavas basálticas y riolíticas emplazados en el Oligoceno, así como ignimbritas, plutones granodioríticos y lavas basáltico- andesíticas del Mioceno Temprano; mientras que el sur presenta pulsos de ignimbritas silíceas, domos riolíticos y estructuras de calderas que datan del Oligoceno y Mioceno Temprano (Ferrari, Valencia-Moreno and Bryan, 2007).

Rocas volcánicas post- ignimbríticas: Se trata de pulsos magmáticos de composición más heterogénea que aparecieron en las etapas finales o después de cada pulso ignimbrítico. Un primer grupo de andesitas y basaltos del Oligoceno se encuentra distribuido en la zona norte y central, en los estados de Chihuahua, Sinaloa, Durango, Arizona y Nuevo México, éste forma parte de la Provincia Basáltico- Andesítica del Sur propuesta por (Cameron *et al.*, 1989). El segundo grupo está caracterizado por rocas alcalinas del Mioceno y consiste en una secuencia de ignimbritas, lavas riódacíticas y riolíticas peralcalinas. En el resto de la SMO, el vulcanismo alcalino consiste en basaltos emplazados mediante fisuras, así como de campos monogenéticos.

Relleno sedimentario

En el Eoceno Inferior, lavas de composición basáltica y andesítica, con una edad de 48 [Ma] afloran en el GJ y en los valles de la Sierra de Morones (Webber, Fernandez and Simmons, 1994). Cubriendo discordantemente, se encuentra una secuencia de arenisca intercalada con limolita y conglomerado con clastos líticos de andesita, perteneciente al Eoceno Superior.

Durante el Eoceno Tardío, la SMO sufrió diferentes episodios de extensión cortical que dieron paso al desarrollo de cuencas en las que se depositaron sedimentos de origen fluvial y lacustre. Éstos aparecen intercalados con los productos volcánicos mencionados anteriormente. En la porción norte y central existen sucesiones gruesas y compactadas de conglomerados y areniscas sobreyacidas por lavas y tobas que datan del Oligoceno, mientras que en el sur las secuencias de relleno comenzaron a formarse en el Mioceno e incluyen conglomerados, gravas, arenas, areniscas y en algunos casos margas, calizas y pedernal (Nieto-Samaniego *et al.*, 1999)

Complejo Volcánico Superior

Una secuencia de ignimbritas cuyo emplazamiento comenzó en el Oligoceno Inferior se emplaza de manera discordante a las rocas del Eoceno. El primer paquete se conforma de flujos

de ceniza de 50 m. de espesor, densamente soldadas y con alto contenido de cristales, posteriormente depósitos de caída pobremente soldados e intercalados con sedimentos volcanoclásticos, conocidos como “Toba San Miguel”. Posteriormente le sobreyace la ignimbrita conocida como “Toba Boquillas”, la cual mide 100 [m] de espesor y va de pobre a densamente soldada con fragmentos de pómez. Ésta se encuentra distribuida a lo largo del municipio de Juchipila. Por último, está la “Toba Los Indios” cuyos depósitos de caída son horizontales y conforman una unidad de 150 [m] de espesor, estos se encuentran distribuidos principalmente en la Sierra de Morones (Webber, Fernandez and Simmons, 1994).

Formación Juchipila

La extensión cortical y los últimos flujos de lavas pertenecientes al Complejo Volcánico Superior, derivaron en la interrupción del drenaje del Valle de Juchipila, esto provocó la acumulación de sedimentos lacustres y fluviales durante el Mioceno Tardío mismos que posteriormente se identificaron como la “Formación Juchipila” (Lahiere, 1982). Ésta se encuentra integrada por secuencias aluviales y fluviales conformadas por areniscas y conglomerados volcanoclásticos intercalados con depósitos volcánicos de caída y depósitos lacustres con carbonatos.

Esta sucesión, es de tipo granocreciente hasta llegar a grava, mientras que los estratos de sedimentos finos disminuyen. Algunos depósitos de talud se localizan al interior del graben, producto de la meteorización de las ignimbritas emplazadas durante el Oligoceno (Carranza-Castañeda *et al.*, 2013).

La distribución geográfica de los afloramientos mencionados dentro del área de estudio se expone en la Fig. 2.3. En la Fig. 2.4 se muestra la columna estratigráfica regional generada dentro del proyecto de investigación (Ferrari *et al.*, 2018).

Mapa geológico regional

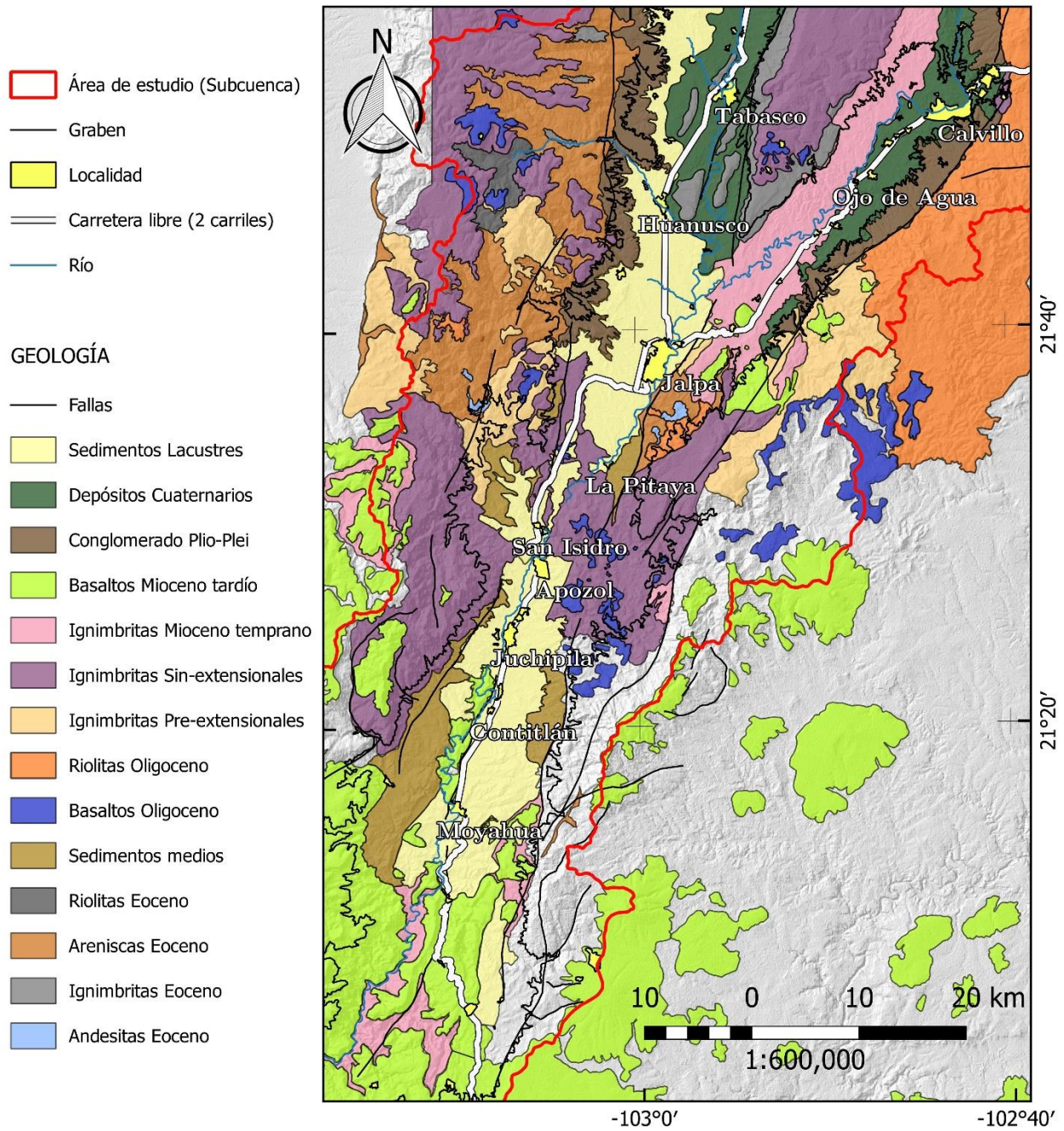


Fig. 2.3. Mapa geológico regional (Ferrari *et al.*, 2018). Editado por autor.

Columna estratigráfica regional

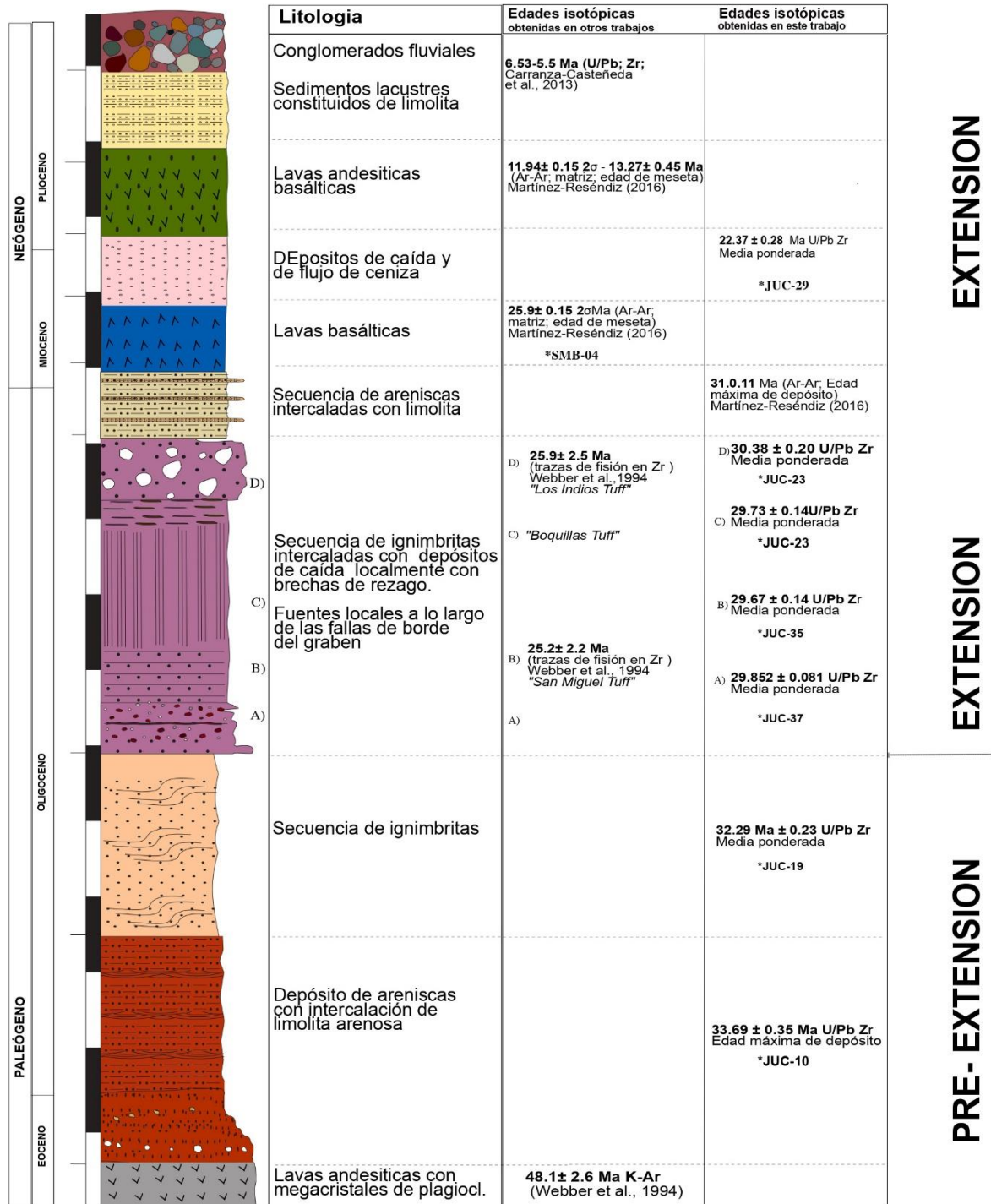


Fig. 2.4. Columna estratigráfica regional (Ferrari *et al.*, 2018).

2.2 Hidrología de superficie

Al área donde se encuentra el graben, le corresponde el Acuífero Jalpa – Juchipila. La zona en la que se ubica el acuífero se localiza en la porción norte de la Región Hidrológica No. 12 “Lerma-Santiago”, Subregión Hidrológica Alto Santiago, dentro de las cuencas conocidas como Presa El Chique, Río Juchipila 1 y Río Juchipila 2, que están delimitadas al oeste por el parteaguas que forma la Sierra de Morones; y al este por la Sierra Fría y Sierra de Nochistlán. Esta cuenca tiene forma alargada y orientada en dirección NE-SW; al norte se inicia a la altura de la Presa El Chique (CONAGUA, 2018).

El río colector más importante de la zona es el río Juchipila, que se origina en la porción centro-sur del estado de Zacatecas, a una altitud de 2,600 msnm, y desemboca en el Río Santiago, en el estado de Jalisco, antes de su recorrido de norte a sur que atraviesa los municipios de Villanueva, Tabasco, Huanusco, Jalpa, Apozol, Juchipila, Moyahua y Mezquital del Oro. Su longitud estimada es de 250 [km], recorre sus primeros 232 [km] con dirección sureste y sólo en los últimos 18 km cambia de rumbo hacia el oeste para confluir al Río Santiago, a una altitud de 800 msnm, por lo que su pendiente media es de 0.72%. Tiene un área de aportación de 8,552 [km²] y sus afluentes principales son los ríos Tabasco y Calvillo.

A lo largo de su travesía por el acuífero es alimentado por corrientes intermitentes, manantiales y arroyos entre los que destacan los arroyos: San Nicolás, Clavellinas, El Rodeo, El Aguacate y El Teto, entre otros. Aguas abajo, en el municipio de Villanueva, se incorporan al Río Juchipila, los arroyos Palomas, Zapoqui y el Uncidero, que drenan la vertiente NW de la Sierra Fría, que separa a Zacatecas del estado de Aguascalientes. En esta región se forma el Río Calvillo que drena las sierras Tlachichila y El Laurel, para finalmente desembocar en el río Juchipila. A partir de esta conjunción se forma el conocido Cañón del Juchipila. En esta región se amplía la cuenca del río y del acuífero hacia el oriente, aumentando también la influencia de la precipitación (CONAGUA, 2018).

En la superficie que cubre el acuífero existen 14 presas y bordos de importancia para la región, que en su conjunto tienen una capacidad de almacenamiento de 224.8 [hm³]. El uso principal del agua de las presas es para riego agrícola, en beneficio de 7,645 hectáreas, principalmente por sistema de gravedad a través de canales y en algunos sitios mediante bombeo. El Arroyo Malpaso y el Río Palomas son afluentes del Río Villanueva, el cual es controlado por las presas Tayahua (38 [hm³]) y El Chique (139 [hm³]). A la altura de la Ciudad de Jalpa, se incorpora el Río Calvillo, y de nuevo el Río Juchipila es retenido, esta vez por la presa Achoquen (10 [hm³]). De ahí toma dirección norte-sur hasta las cercanías de la Ciudad de Juchipila, para dirigirse ligeramente al oeste donde se le incorpora el Arroyo Mezquitil para finalmente desembocar en el Río Santiago, en el estado de Jalisco.

Climatología.

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García (1964) (Pidwinry, 2011), para las condiciones de la República Mexicana, en la mayor superficie del acuífero domina el clima semiseco BS₁hw (w), que se caracteriza por presentar una temperatura media anual que varía entre 18 y 22 [°C], la temperatura media del mes más frío es menor de 18 [°C], con invierno fresco y régimen de lluvias en verano, con lluvias invernales menor de 5 %.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 10 estaciones que se ubican dentro del área del acuífero: Presa Julián Adame, Juchipila, Palma Cuata, El Tecomate, La Pitaya, Jalpa, Huanusco, Presa El Chique, Tayahua y Moyahua de Estrada. Con los registros obtenidos para diferentes periodos, el más grande 1947-2014 y el más corto 2000-2014, y utilizando el método de configuración de curvas de igual valor, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anual de 537.2 [mm], 20.4 [°C] y 2,200 [mm], respectivamente dichos datos se exponen de la Fig. 2.5 a la Fig. 2.7.

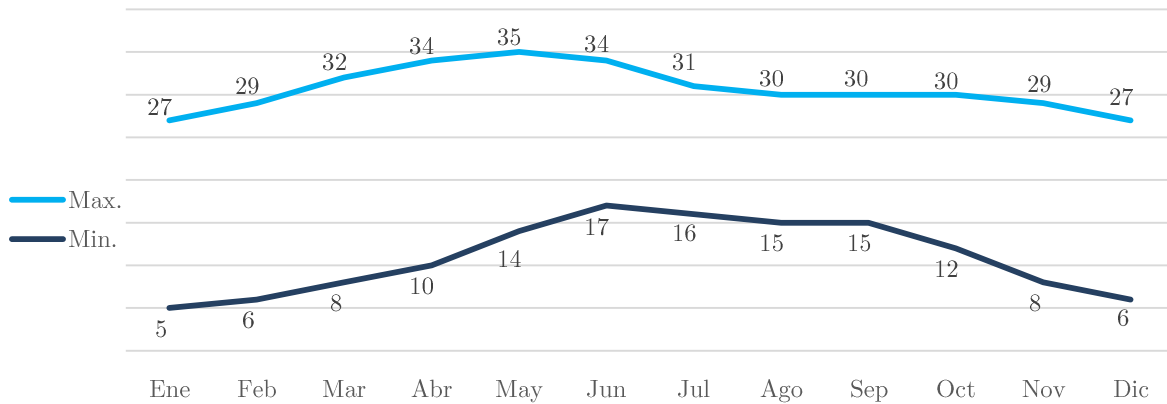


Fig. 2.5. Temperaturas máximas y mínimas promedio [°C] en la región de Jalpa, 2009 - 2019 (NOAA, 2019).

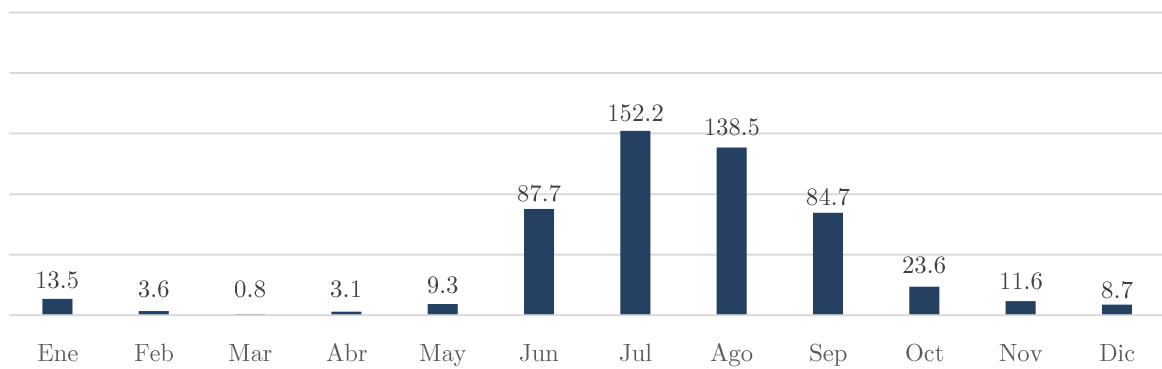


Fig. 2.6. Precipitaciones anuales promedio [mm] en la región del Acuífero Jalpa - Juchipila, 2012 - 2017 (CONAGUA, 2018).

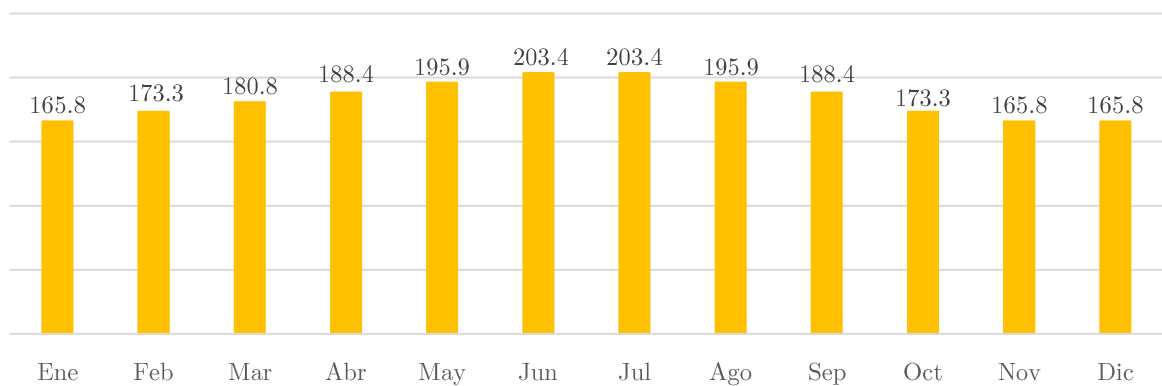


Fig. 2.7. Evaporación potencial media anual [mm] en la región del Acuífero Jalpa - Juchipila, 2012 - 2017 (CONAGUA, 2018).

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia: uno en verano de junio a septiembre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que se registran de noviembre a febrero, con precipitaciones menos significativas provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan a la región. La temporada de estiaje total ocurre de marzo a mayo, la región presenta de 0 a 25 heladas por año y granizadas de 0 a 2 días anuales (CONAGUA, 2018).

2.3 Hidrología subterránea

Tipo de acuífero.

Según el análisis de Actualización de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Jalpa-Juchipila, realizado por la CONAGUA en enero de 2015, se identificó un acuífero de tipo libre, constituido en su mayoría por un medio granular en la parte superior y uno fracturado en la parte inferior. La porción superior tiene un espesor del orden de 150 [m] en la parte central, mientras que la porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. También se ha detectado, la presencia de sedimentos lacustres y arcillas al interior del graben (CONAGUA, 2018).

De acuerdo con la información geofísica, el basamento del acuífero puede estar constituido por un material arcillo-arenoso.

Revisión de usos de agua subterránea

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el año 2005 y complementada con datos actuales del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA), en el acuífero Jalpa-Juchipila se registraron un total de 1050 obras que aprovechan el agua subterránea, 388 pozos, 604 norias y 58 manantiales (Fig. 2.8); de las cuales 989 están activas y 61 se consideran inactivas; 52 pozos y 9 norias (Fig. 2.9).

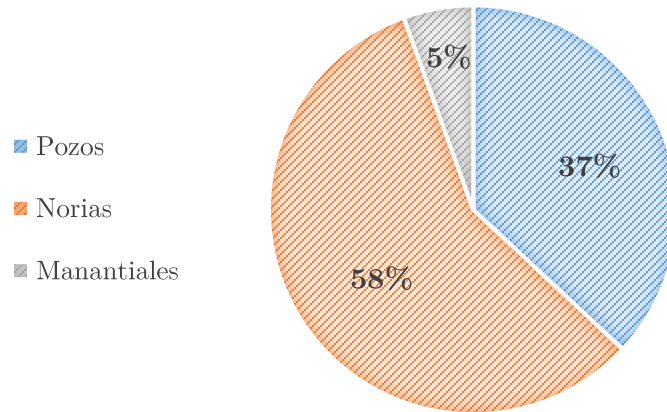


Fig. 2.8. Tipo de aprovechamientos en el acuífero Jalpa - Juchipila en 2018.

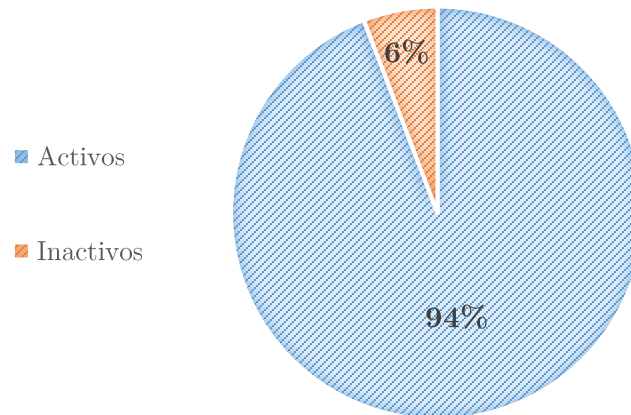


Fig. 2.9. Estatus de aprovechamientos en el acuífero Jalpa - Juchipila en 2018.

De las obras activas, 472 se destinan al uso agrícola, 400 para uso público-urbano, 104 para uso doméstico y pecuario, 7 de servicios y 6 al uso industrial (Fig. 2.10). El volumen de extracción asciende a 63.1 [hm³] anuales, de los cuales 53.4 [hm³] se destinan al uso agrícola, 8.7 [hm³] para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, y el restante 1.0 [hm³] se dedica al suministro de los usos pecuario, doméstico y servicios (Fig. 2.11).

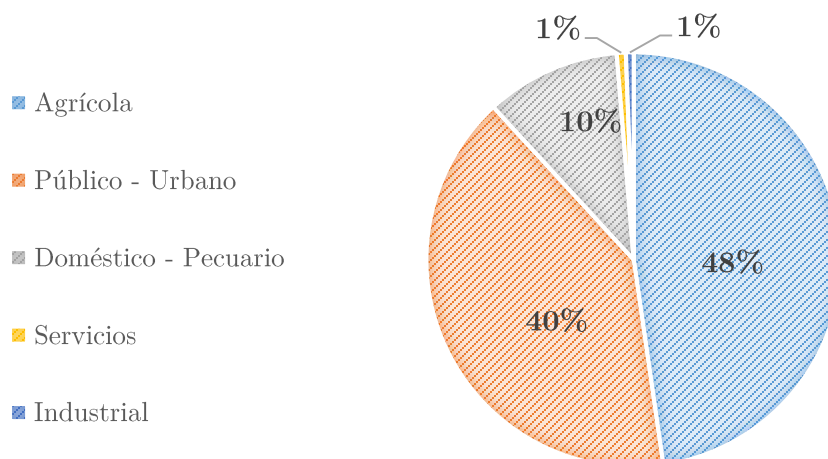


Fig. 2.10. Uso de aprovechamientos en el acuífero Jalpa - Juchipila en 2018.

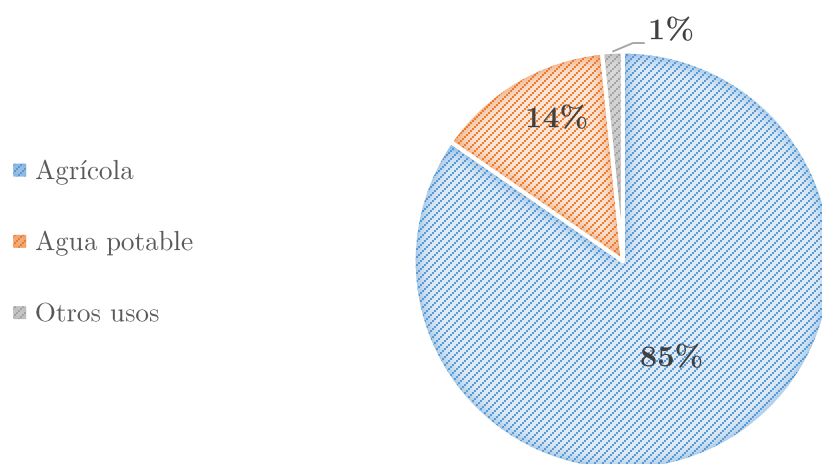


Fig. 2.11. Uso del volumen de extracción en el acuífero Jalpa - Juchipila en 2018.

Adicionalmente, a través de los 58 manantiales identificados se descarga un caudal conjunto estimado de 45 [l/s], que equivalen a 1.4 [hm³] anuales, destinado en su mayoría al uso agrícola.

3. Métodos

3.1 Revisión de información existente

Revisión de hidrogeología y cartografía de CONAGUA.

Se efectuó la recopilación de información de estudios geológicos e hidrogeológicos realizados para CONAGUA y para el Gobierno Estatal de Zacatecas, en el área que comprende el graben, por parte de las siguientes empresas:

- ❖ Técnicos Asesores y Constructores, S. A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en el año 1980.
- ❖ Lesser y Asociados S.A. de C.V. En el año 2004.
- ❖ Consultoría BETSCO S.A. de C.V. En el año 2005.

Con estos estudios se integró la base de datos inicial desde la cual se definieron los ejes a seguir para una adecuada caracterización hidrogeológica. Para dicha base de datos se consideraron los siguientes campos mostrados en la Tabla 3.1. Cabe destacar que para PNE_CONF, ENE_CONF y TEMP_CONF se consideró el valor más actualizado de dichos parámetros.

CAMPO	DESCRIPCIÓN
CVE_INT	Asigna una clave interna con la cual se identifican todos los aprovechamientos localizados en el área del graben, la primer letra corresponde al tipo de aprovechamiento; P = pozo, N = noria, M = manantial. Los siguientes 3 dígitos son la numeración consecutiva que fue asignada a cada aprovechamiento.
CVE_ORG	Registra la clave original asignada a los aprovechamientos en los estudios previos.
CVE_BETSCO	Registra la clave asignada por la empresa BETSCO, esta clave sirvió también para identificar las pruebas de bombeo realizadas en el área.
LOCALIDAD	Nombre del poblado grande más próximo.
NOM_ACUI	Nombre del acuífero donde se localiza el aprovechamiento.
CVE_ACUI	Clave del acuífero donde se localiza el aprovechamiento.
CVE_MUN	Clave del municipio donde se localiza el aprovechamiento.
APR_TIPO	Tipo de aprovechamiento; pozo, noria o manantial.
X	Longitud del aprovechamiento en coordenadas UTM Zona 13 Norte.
Y	Latitud del aprovechamiento en coordenadas UTM Zona 13 Norte.

Z_ASTER	Elevación del relieve en la ubicación del aprovechamiento en [msnm] según el modelo ASTER.
Z_CAMPO	Elevación del relieve en la ubicación del aprovechamiento en [msnm] según datos tomados en campo.
ADEME	Medida del ademe en [in].
PTP	Profundidad total del pozo en [m].
ALT_BROC	Altura del brocal en [m].
DIAM_DES	Diámetro del tubo de descarga en [m].
USO	Uso del aprovechamiento.
PNE_AA	Profundidad de nivel estático del aprovechamiento en [m] para el año AA.
PNE_MMM_AA	Profundidad de nivel estático del aprovechamiento en [m] para el mes MMM del año AA.
PNE_CONF	Profundidad de nivel estático del aprovechamiento en [m] que se consideró para hacer la caracterización hidrogeológica final.
ENE_AA	Elevación de nivel estático del aprovechamiento en [m] para el año AA, empleando el modelo de elevación ASTER.
ENE_MMM_AA	Elevación de nivel estático del aprovechamiento en [m] para el mes MMM del año AA, empleando el modelo de elevación ASTER.
ENE_CONF	Elevación de nivel estático del aprovechamiento en [m] que se consideró para hacer la caracterización hidrogeológica final.
PND_AA	Profundidad de nivel dinámico del aprovechamiento en [m] para el año AA.
PND_MMM_AA	Profundidad de nivel dinámico del aprovechamiento en [m] para el mes MMM del año AA.
TEMP_MMM_AA	Temperatura del aprovechamiento en [°C] para el mes MMM del año AA.
TEMP_C#	Temperatura del aprovechamiento en [°C] registrada en el censo #.
TEMP_CONF	Temperatura del aprovechamiento en [°C] que se consideró para hacer la caracterización hidrogeológica final.
FUENTE	Fuente de la medición más reciente del aprovechamiento.
OBS	Observaciones del aprovechamiento realizadas in situ.

Tabla 3.1. Descripción de campos considerados en las bases de datos del proyecto.

3.2 Configuración piezométrica del acuífero

Con base en la información recabada de manera preliminar de los informes y sondeos previos de la región, se estableció la primera base de datos (Tabla 3.2), una vez organizado el universo de datos iniciales, se efectuó un análisis profundo y posterior discretización de los

mismos. Se consideraron prioritariamente las inconsistencias detectadas en los datos de PNE, ENE y TEMPERATURA reportados en los estudios previos y dada la enorme área que comprende el graben, se determinaron puntos estratégicos para efectuar revisiones en los aprovechamientos anómalos y también en áreas de alta relevancia para la búsqueda y el consecuente censado de aprovechamientos inéditos, es decir aquellos no utilizados por dichos estudios.

TIPO DE APROV.	POZOS			NORIAS			MANANTIALES			TOTAL	ÚTILES
	F	C	ST	F	C	ST	F	C	ST		
EXISTENTES	2	5	44	0	0	11	6	15	1		
TOTAL	51			11			22			84	63

Tabla 3.2. Resumen de aprovechamientos disponibles en bibliografía.

* F = Frio, C = Caliente, ST = Sin registro de temperatura.

En junio de 2017 se efectuó la primera visita a campo con duración de 1 semana. Mediante el empleo de una sonda eléctrica de 200 [m] se verificó la profundidad de nivel estático (PNE) de un total de 14 aprovechamientos; 5 pozos, 6 norias y 3 manantiales. En la Tabla 3.3 se presenta un resumen de los datos acumulados de los aprovechamientos disponibles después del trabajo en campo. Cabe resaltar que los aprovechamientos existentes solo aumentan en relación con los aprovechamientos inéditos detectados, los aprovechamientos verificados únicamente influyen en la utilidad o no de los aprovechamientos existentes.

TIPO DE APROV.	POZOS			NORIAS			MANANTIALES			TOTAL	ÚTILES
	F	C	ST	F	C	ST	F	C	ST		
VERIFICADOS	2	0	0	0	0	0	0	1	0	3	2
INEDITOS	2	0	1	1	0	5	0	2	0	11	9
EXISTENTES	4	5	45	1	0	16	6	17	1	95	74
TOTAL	54			17			24				

Tabla 3.3. Resumen de aprovechamientos disponibles después de trabajo en campo de jun-2017.

* F = Frio, C = Caliente, ST = Sin registro de temperatura.

Derivado de dicho trabajo se configuró la primera versión de red de flujo, empleando la mayoría de datos previos y la totalidad de datos medidos en campo. Para ello, se utilizó el

software Surfer 11 ('Surfer 11', 2013) para generar las mallas y después el programa Qgis 2.18.4 (Team, 2002) para generar los rasters con los cuales se crearon equipotenciales, mismas que fueron analizadas y discretizadas cuidadosamente para ajustar quiebres y uniones que el software generalizaba por completo. Cabe destacar que primero se transformaron los datos de PNE a elevación de nivel estático (ENE) utilizando un modelo digital de elevación (DEM) generado por ASTER (NASA, 2016).

Una vez revisados y discutidos todos los pormenores relativos a los resultados actuales, se procedió a efectuar la segunda salida a campo en diciembre de 2017, misma que también tuvo una duración de 1 semana y en la cual se realizó un recorrido programado y eficiente en los puntos de mayor incertidumbre, para verificar datos existentes anómalos y también para obtener nuevos datos en zonas con carencia de ellos.

En total, se revisaron 18 aprovechamientos, de los cuales 11 corresponde a pozos y 7 a norias. Se hizo un recorrido programado en zonas donde antes no existían aprovechamientos registrados y se pudo obtener un total de 15 datos inéditos, con los cuales se enriqueció la base de datos. La Tabla 3.4 presenta un resumen de los datos de aprovechamientos acumulados hasta ese momento.

TIPO DE APROV.	POZOS			NORIAS			MANANTIALES			TOTAL	ÚTILES
	F	C	ST	F	C	ST	F	C	ST		
TEMPERATURA	F	C	ST	F	C	ST	F	C	ST		
VERIFICADOS	2	1	0	0	0	0	0	0	0	3	3
INEDITOS	2	2	4	1	1	5	0	0	0	15	13
EXISTENTES	6	7	49	2	1	21	6	17	1	110	90
TOTAL	62			24			24				

Tabla 3.4. Resumen de aprovechamientos disponibles después de trabajo en campo de dic-2017.

* F = Frio, C = Caliente, ST = Sin registro de temperatura.

Para efectuar la configuración de la red de flujo correspondiente, se emplearon únicamente los datos medidos en los trabajos en campo, dado que aun persistían ciertos pozos

con datos difícilmente creíbles por la región en donde se encontraban. Finalmente en junio de 2018 se efectuó la tercera y última salida a campo, con el objetivo primordial de verificar más datos de la base de datos inicial y en zonas específicas obtener algunos datos más de PNE particularmente de pozos, los resultados cuantitativos acumulados con dicha salida se exponen en la Tabla 3.5.

TIPO DE APROV.	POZOS			NORIAS			MANANTIALES			TOTAL	ÚTILES
	F	C	ST	F	C	ST	F	C	ST		
TEMPERATURA	F	C	ST	F	C	ST	F	C	ST		
VERIFICADOS	7	1	6	0	0	0	0	0	0	14	9
INEDITOS	4	1	4	0	0	0	0	0	0	9	6
EXISTENTES	10	8	53	2	1	21	6	17	1	119	105
TOTAL	71			24			24				

Tabla 3.5. Resumen de aprovechamientos disponibles después de trabajo en campo de jun-2018.

* F = Frio, C = Caliente, ST = Sin registro de temperatura.



Fig. 3.1. Trabajo de campo con el Ing. Arias Paz, medición de profundidad de nivel estático y toma de muestra de manantial (Jun – 2018).

3.3 Estimación de parámetros hidráulicos

Pruebas de bombeo

La estimación de los parámetros hidráulicos del subsuelo es un paso imprescindible dentro de la conceptualización de las aguas subterráneas. Para tal efecto, es necesario realizar pruebas de bombeo que permitan obtener datos confiables de tiempos de abatimiento del pozo en cuestión.

Durante las jornadas en campo, se realizaron pruebas de bombeo de los pozos: P068 El Contadero, P062 Mezquite Redondo, P061 Rancho Los Arcos y P049 Paraíso Caxcán (San Isidro), sin embargo, dadas las condiciones de tiempo limitado y de la operación de pozos de extracción cercanos, estas resultaron ser no interpretables.

Ante tal hecho, se procedió entonces a efectuar la interpretación de los datos recolectados por las pruebas de bombeo que pertenecen al estudio de BESTCO (2005). La ubicación de los pozos a los que corresponden todos los ensayos realizados se ilustra en la Figura 3.1. Estas interpretaciones fueron realizadas por el Ing. Arias Paz perteneciente al grupo de hidrogeología de la Facultad de Ingeniería en 2017 y una segunda versión por el autor para comparar y posteriormente discretizar los resultados obtenidos en 2019.

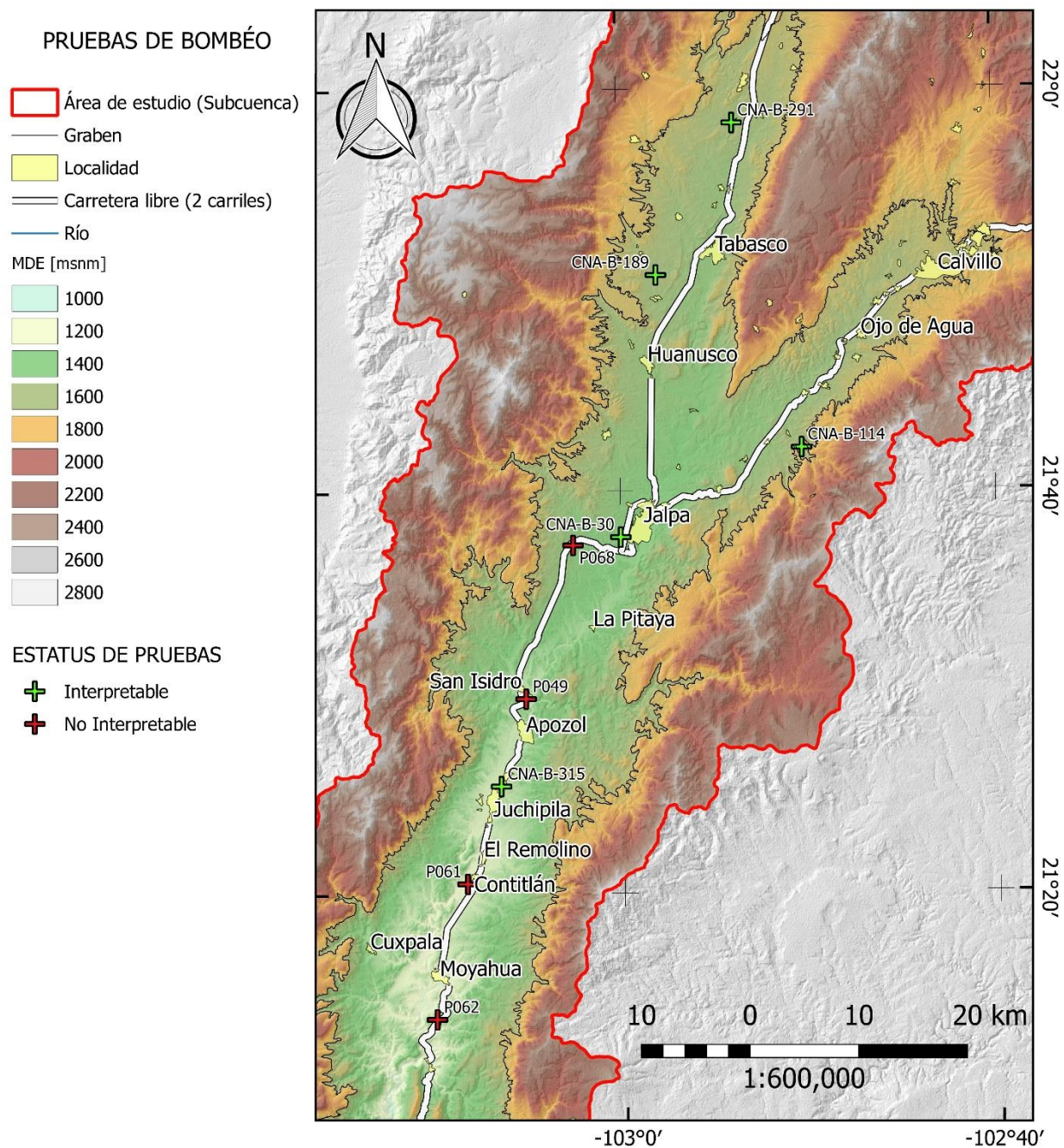


Fig. 3.2. Localización de los pozos con prueba de bombeo.

Para la interpretación de los ensayos de bombeo, un primer acercamiento es la comparación de la curva tiempo vs abatimiento ($s-t$) de los ensayos de bombeo con respecto a modelos teóricos (Kruseman and De Ridder, 1990) que se ilustran en la Fig. 3.2, para

identificar las condiciones hidráulicas que condicionan el flujo del agua subterránea hacia un pozo de bombeo.

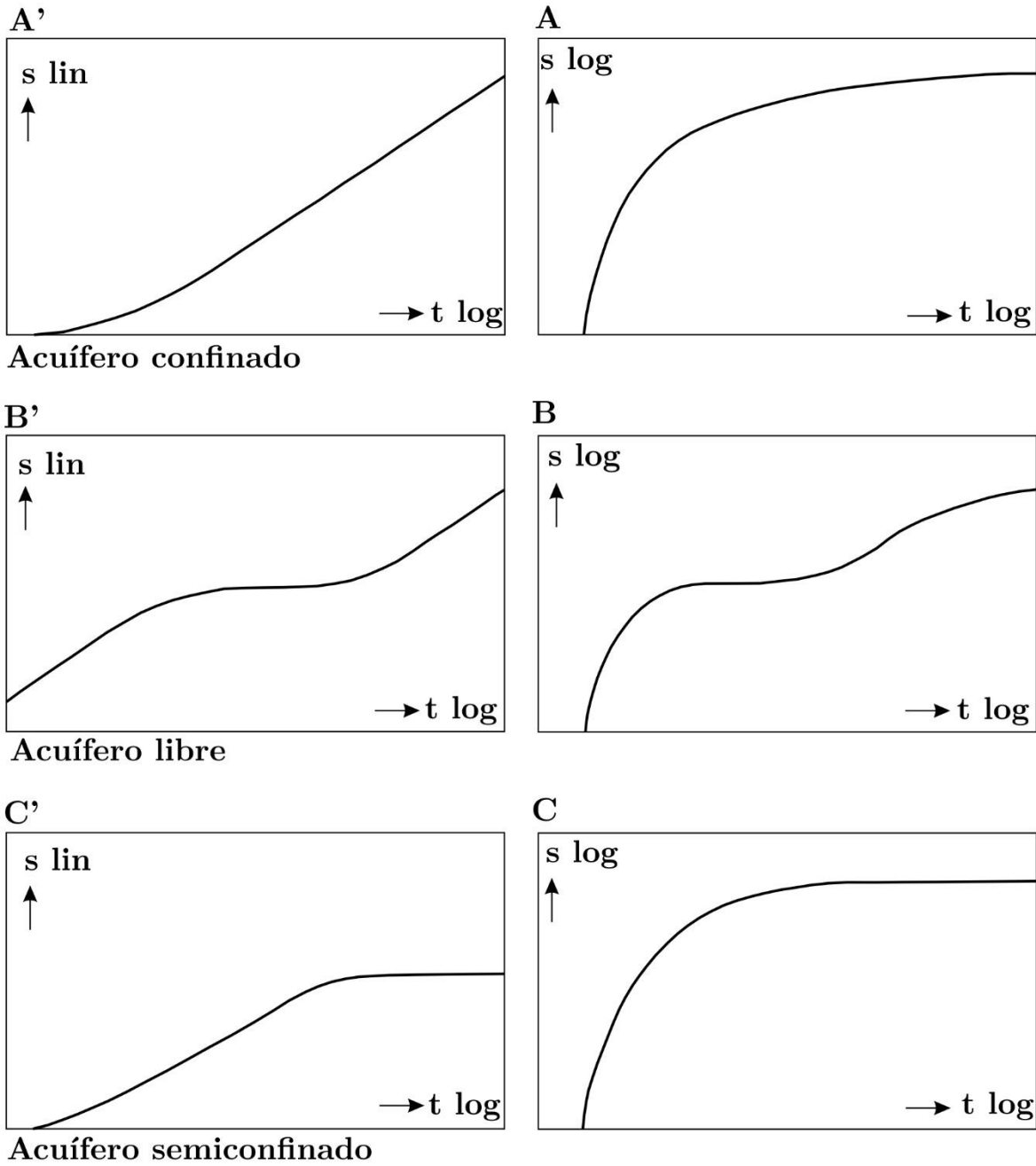


Fig. 3.3. Relaciones teóricas tiempo-abatimiento en sistemas-acuíferos granulares, sin consolidar (Kruseman and De Ridder, 1990).

En ese sentido, se procedió a la elaboración de las gráficas de tiempo *versus* abatimiento de las pruebas de bombeo por analizar. En figuras posteriores se presentan estos gráficos, los que se interpretaron por métodos analíticos y numéricos, como se explica más adelante.

Configuración espacial de T

Para la interpretación de los ensayos de bombeo, se aplicaron los métodos de solución: Theis (abatimiento y recuperación) (Theis, 1935), Cooper-Jacob (Cooper Jr and Jacob, 1946), Walton (Walton, 1990) y Neuman (Neuman and Witherspoon, 1969) por parte del Ing. Arias Paz y Cooper-Jacob (Cooper Jr and Jacob, 1946), así como los métodos de Hantush (Hantush, 1960), Tartakovsky-Neuman (Tartakovsky and Neuman, 2007), Theis (abatimiento) (Theis, 1935) y Moench (Moench, 1997) efectuados con el software AQTESOLV Pro (Glenn M, 2007) por el autor. Los resultados obtenidos con estas metodologías analíticas fueron principalmente: Transmisividad (T), conductividad hidráulica (K) y coeficiente de almacenamiento (s), este último únicamente aproximado ya que no se contó con pozos de observación.

3.4 Correlación geológico-geofísica

Mediante los sondeos magnetotelúricos (MT), realizados por el equipo de geofísica del proyecto en 4 secciones transversales a lo largo del GJ, se logró estimar la distribución de conductividad eléctrica en el subsuelo a partir de mediciones del campo electromagnético natural de la Tierra.

El principio físico del método consistió en registrar de forma simultánea las variaciones de los campos eléctricos y magnéticos naturales de la Tierra. La relación lineal existente entre ambos campos se denomina impedancia electromagnética (z) y es precisamente esta magnitud la que permitió conocer la distribución de resistividad en el subsuelo (GEOTEM, 2016). Las mediciones se llevan a cabo mediante magnetómetros de inducción (de amplio espectro) y

dipolos eléctricos aterrizados. Este tipo de sondeos tienen un alcance de hasta 50 [km] de profundidad

Modelos 1D

Con los sondeos realizados en campo se elaboraron modelos de inversión de Occam y Bostick (Van Tuyen *et al.*, 2015), los cuales muestran la relación que existe entre la resistividad aproximada y la profundidad y cuyo radio de influencia llega hasta los 6 [km] (Del Valle-Toledo, 1985).

Empleando estos modelos, se efectuó una correlación de la resistividad de los aprovechamientos que se encontraran ubicados hasta a 5 [km] de distancia del punto del sondeo y por ende que se encontraban dentro del radio de influencia del mismo. La correlación se hizo en función de la profundidad del nivel estático del aprovechamiento, es decir, con el nivel freático.

Modelos 2D

Con los mismos sondeos mencionados en la sección anterior, se construyeron también perfiles geoelectricos con los cuales se efectuó un análisis de resistividades y se determinaron las unidades geoelectricas predominantes. A través de estas unidades fue posible inferir algunas estructuras como fallas y también definir algunas litologías correspondientes con el nivel de resistividad de la unidad en cuestión, no obstante, el nivel de detalle de los sondeos es bajo debido a la amplia cobertura elegida para el sondeo (hasta 8 [km] de profundidad), por lo cual los resultados son difícilmente útiles para evidenciar los niveles freáticos, los cuales rondan entre los 0 y hasta los 220 [m] de profundidad.

3.5 Temperatura del agua subterránea

Los parámetros fisicoquímicos se midieron empleando un medidor multiparamétrico HANNA HI 9828 (figura 3.3). Este dispositivo permitió obtener datos temperatura [°C], conductividad eléctrica [$\mu\text{S}/\text{cm}$], sólidos disueltos totales [ppm], pH y potencial de oxidación-reducción [V] en 66 aprovechamientos. Se utilizó agua destilada para enjuagar los sensores del medidor entre cada toma de muestra.



Fig. 3.4. Medidor multiparamétrico HANNA HI 9828.



Fig. 3.5. Mediciones en campo con medidor multiparamétrico HANNA HI 9828 (Jun 2018).

4. Resultados y discusión

4.1 Configuración piezométrica

Estudios previos

El estudio: Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en las zonas de Tlaltenango – Juchipila, Estado de Zacatecas. Realizado por la empresa Técnicos Asesores y Constructores, S. A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en el año 1980, tuvo como objetivo conocer el marco geológico, definir la calidad y distribución del agua subterránea y definir la condición geohidrológica del acuífero. Consistió en un reconocimiento de la zona, un inventario de aprovechamientos de agua subterránea, así como verificaciones geológicas e hidrológicas y recolección de muestras de agua para su análisis químico.

Posteriormente el estudio denominado: Reactivación de la red de monitoreo piezométrico en el acuífero del Valle de Jalpa-Juchipila, Zac. Realizado por Lesser y Asociados S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en el año 2004, se contrató con los objetivos de establecer una red de monitoreo simplificada y confiable para la obtención de información hidrogeológica-piezométrica del acuífero, mediante la ubicación, inspección y selección en campo de pozos de monitoreo, conocer la evolución y la condición actual de los niveles del agua subterránea, así como su comportamiento inducido por causas naturales o antropogénicas, especialmente por el incremento de la extracción para satisfacer el desarrollo futuro de las actividades productivas.

La red piezométrica del acuífero elaborada por este estudio quedó definida por 24 pozos y se muestra en la Figura 4.1.

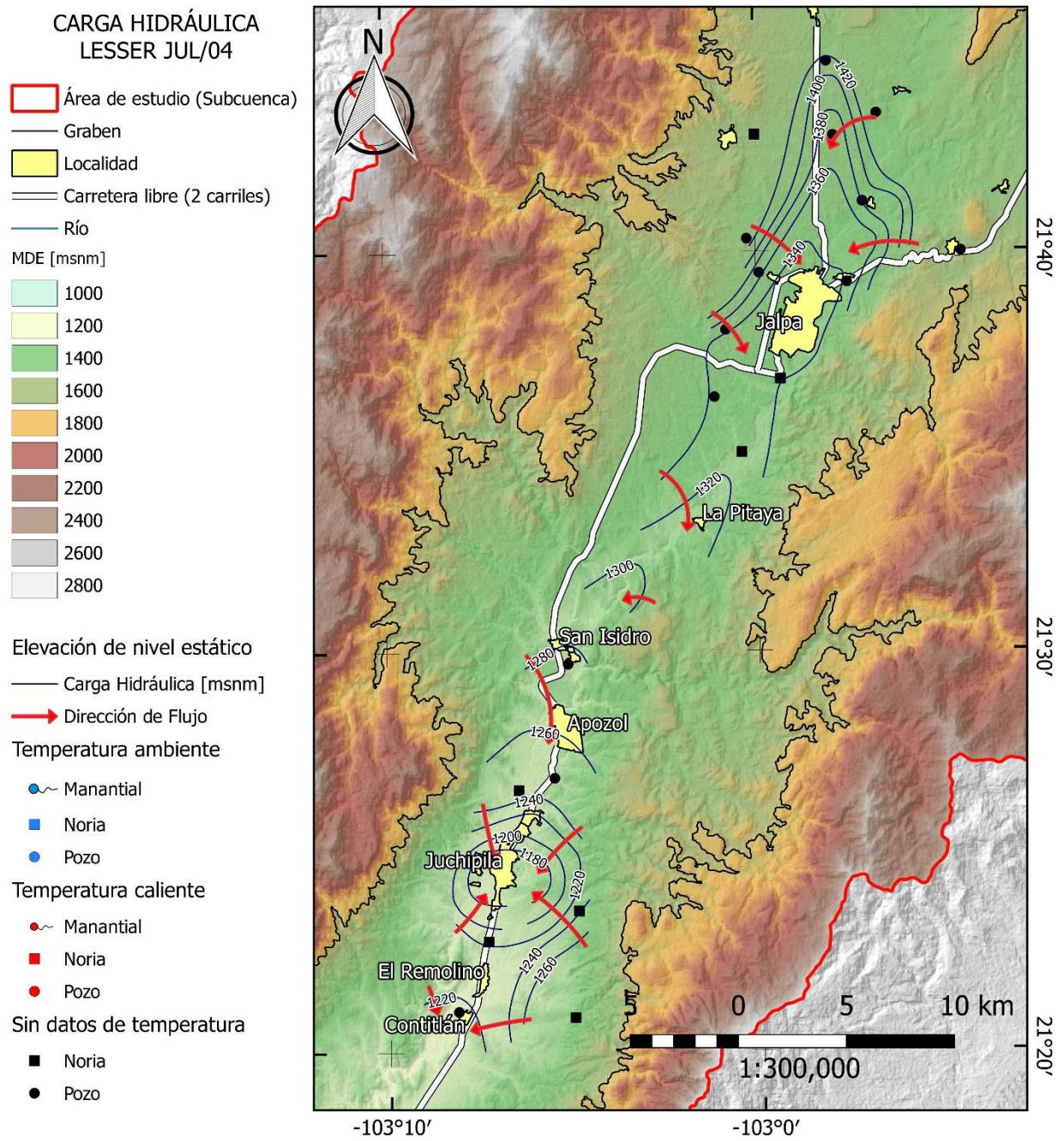


Fig. 4.1. Carga hidráulica configurada por Lesser (Jul 2004), editada por Autor (2018).

Finalmente contamos con los datos de un estudio llamado: Actualización hidrogeológica del acuífero Jalpa-Juchipila en Zacatecas. Realizado por Consultoría BETSCO S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en el año 2005. El objetivo general del estudio fue actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas para establecer un diagnóstico de la

evolución de los niveles del agua y contar con la información geohidrológica necesaria para determinar la recarga media anual del agua subterránea.

Consistió en actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas, llevar a cabo el censo de captaciones de agua subterránea, obtener los valores de los parámetros físicos e hidráulicos regionales que rigen el movimiento del agua en el subsuelo, actualizar el modelo hidrogeológico y la caracterización hidrogeoquímica, determinar el volumen de extracción de aguas subterráneas para los diferentes usos, así como cuantificar la magnitud de los componentes de la recarga natural, inducida y artificial, así como elaborar el balance hidrometeorológico de la subcuenca y de aguas subterráneas del acuífero.

Primera etapa – Jun 2017

Basados en estos estudios, y con los datos recabados en la primer salida a campo en junio de 2017, se elaboró la primer configuración de elevación del nivel estático (Fig. 4.2), la cual permitió definir que las principales zonas de recarga se localizan en las sierras ubicadas al este y oeste del valle y que la dirección preferencial del flujo subterráneo es noreste-suroeste, paralela a la dirección de escurrimiento del río Juchipila.

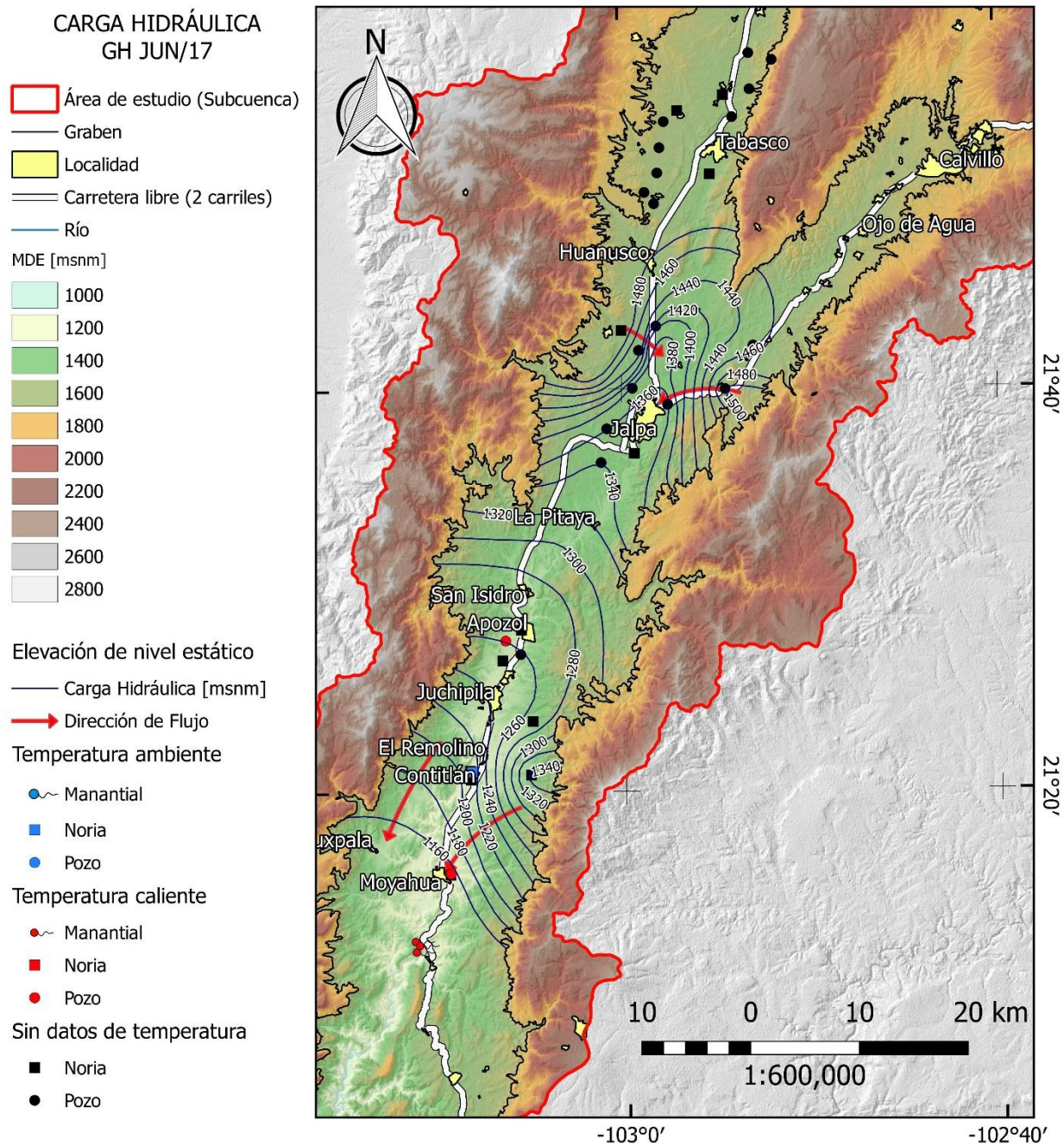


Fig. 4.2. Carga hidráulica configurada por autor (Jun 2017).

A partir de esta configuración se analizaron las posibles causas por las cuales en 2004 la empresa Lesser había concluido que en la región de Juchipila existía un cono de abatimiento, ya que en los resultados que se obtuvieron dentro del proyecto, no apareció dicho cono. También se revisaron y analizaron los datos obtenidos en la parte sureste del graben, pues aparentemente se

detectó una zona de recarga que no se encontraba descrita por la bibliografía ni por los estudios previos.

Segunda etapa – Dic 2017

Con todas las premisas definidas y los objetivos trazados, se procedió a efectuar la segunda salida a campo en diciembre de 2017. Con dicha salida se robusteció la base de datos del proyecto, pues de un total de 18 aprovechamientos visitados, 15 correspondieron a datos inéditos lo cual aumento el universo de datos disponible. Se elaboró una segunda configuración piezométrica (Fig. 4.3) en la cual se pudo apreciar que la zona de recarga que se vislumbraba en la configuración de junio de 2017 en la parte sureste del graben, en realidad era inexistente, y también se corroboró la ausencia de conos de abatimiento.

Dado que se tuvo la oportunidad de medir algunos pozos en operación y con ello obtener niveles dinámicos, se detectó que la posible causa del cono de abatimiento expuesto por la empresa Lesser era por la influencia de niveles dinámicos en la región, pues los datos correspondían mucho con las isopiezas presentadas en su informe.

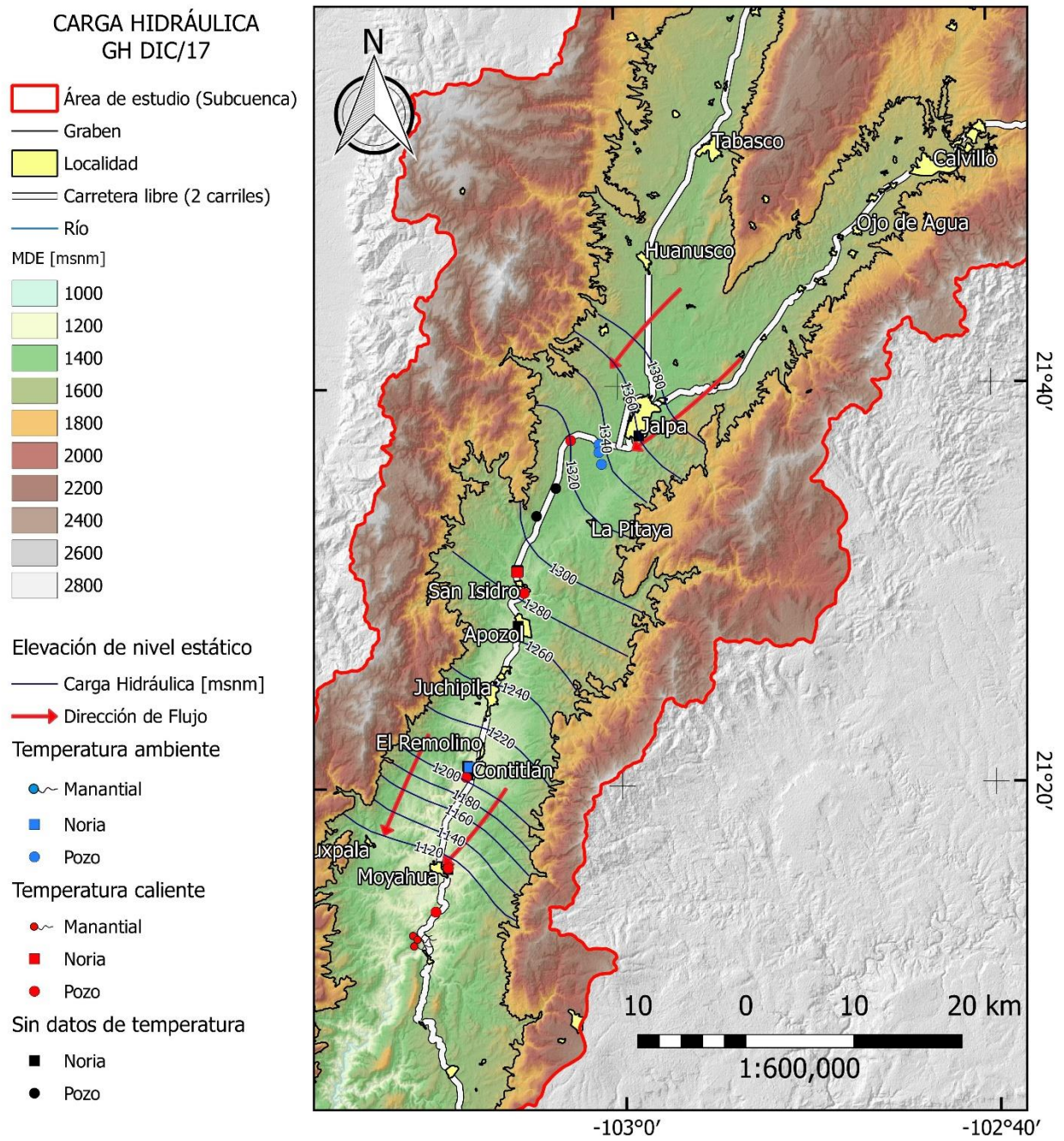


Fig. 4.3. Carga hidráulica configurada por autor (Dic 2017).

Finalmente, con la nueva configuración se determinaron zonas en donde aún existían inconsistencias entre datos bibliográficos y datos medidos en campo, lo que alteraba drásticamente la red de flujo, por lo cual se procedió con una tercera visita a campo en junio de 2018.

Tercera etapa – Jun 2018

Una vez concluidos los trabajos en campo, se actualizó la base de datos general del proyecto y también se construyó una nueva considerando únicamente datos obtenidos o verificados en campo por el grupo de hidrogeología. Esta nueva base de datos era mucho más confiable para la configuración preliminar de la carga hidráulica del acuífero dentro del graben, sin embargo, dado que se contaba únicamente con un universo de 54 datos útiles para la elaboración de la red de flujo de un área de aproximadamente 6000 [km²], esta era insuficiente pues proveía poco detalle a la configuración. Para amortizar esta situación se recurrió al involucramiento secundario de algunos datos cuidadosamente seleccionados, pertenecientes a diversos estudios previos realizados en la región, mismos que ya se encontraban concentrados en la base de datos general del proyecto.

Con la inclusión de estos datos, fue posible tomar decisiones más certeras respecto al trazado de varias isopiezas, esto finalmente permitió concluir configuración de carga hidráulica definitiva expuesta en la Fig. 4.4. En dicha configuración es posible observar un gradiente hidráulico que se acentúa hacia el suroeste del graben. También se puede apreciar la variación drástica de la carga hidráulica en la zona de Jalpa, esto evidencia una intensa explotación del acuífero en la mencionada región y es atribuible al abundante riego empleado, así como a la extracción para consumo humano pues es la zona más densamente poblada dentro de todo el graben. Aun así, se confirma la inexistencia de conos de abatimiento de importancia en el acuífero.

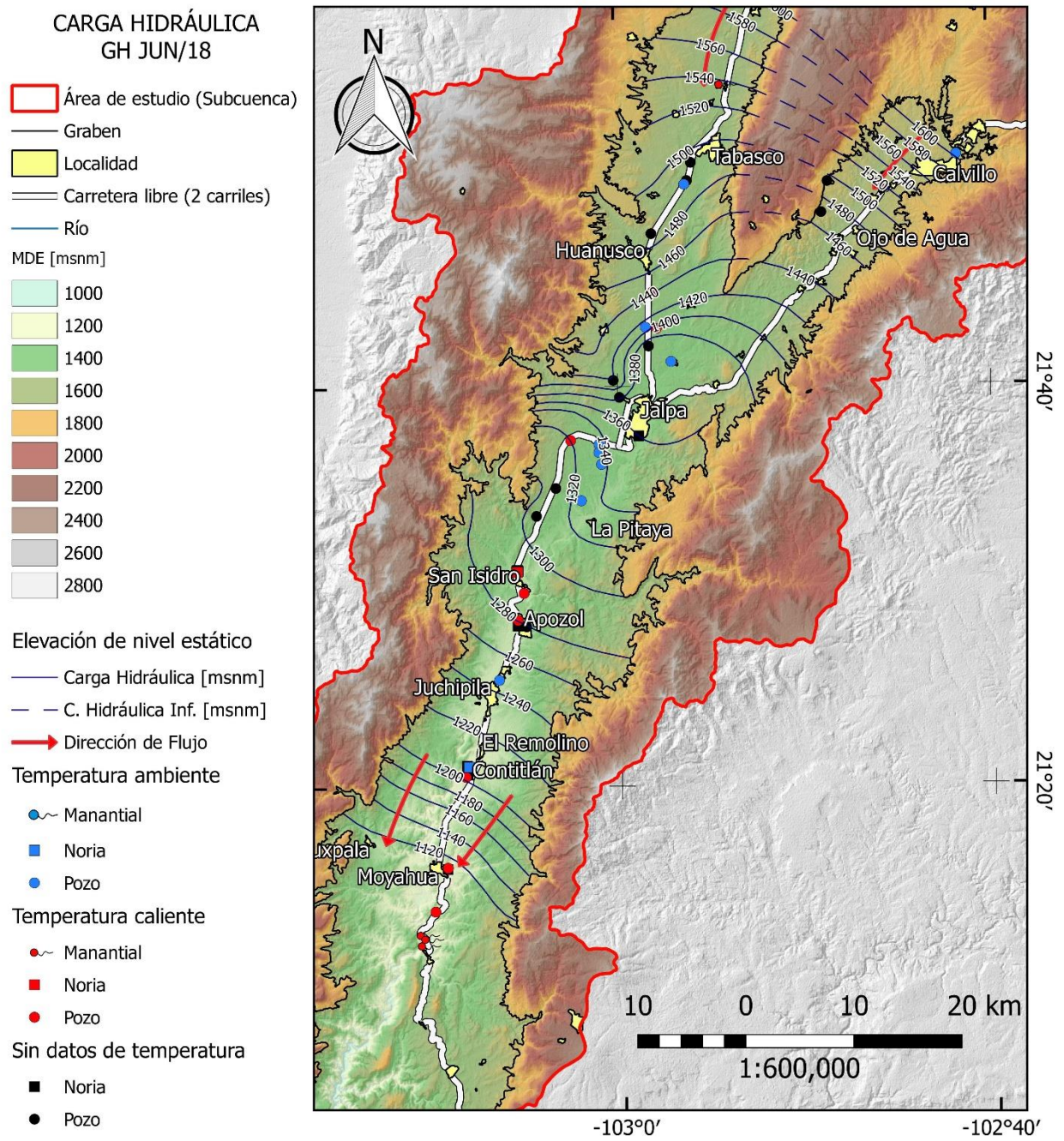


Fig. 4.4. Carga hidráulica definitiva elaborada por autor (Jun 2018).

El análisis de la carga hidráulica confirma que la recarga del acuífero ocurre en los hombros del graben y que estos no representan una frontera impermeable para el mismo debido a la extenso régimen de fracturamiento que presentan las ignimbritas que conforman las paredes.

Mismo caso ocurre en la bifurcación nororiental del graben, en donde un par de pozos ubicados dentro del área de ignimbritas intra-graben acusan que la red hidráulica del acuífero tiene continuidad hasta conectarse con el otro extremo del graben. A pesar de ello son pocos datos en una extensión muy grande de territorio, por lo cual la mayoría de isopiezas que definen esta conexión son inferidas.

4.2 Parámetros hidráulicos

Interpretación de pruebas de bombeo

Durante el 2005 la empresa BETSCO realizó 5 pruebas de bombeo y recuperación dentro del GJ. Las interpretaciones realizadas por la propia empresa a dichas pruebas se muestran en la Tabla 4.1.

POZO	P.T. [m]	P.N.E. [m]	P.N.D. [m]	ABAT. [m]	Q [l/s]	Q. E. [l/s/m]	TRANSM. BOMBEO		TRANSM. RECUP.	
							T [m ² /d]	T [m ² /s]	T [m ² /d]	T [m ² /s]
AGUA BLANCA (CNA-B-291)	130	27.00	28.67	1.67	4.00	3.90	252.98	2.93E-03	210.82	2.44E-03
EL RODEO (CNA-B-189)	170	47.38	67.64	20.26	28.54	1.40	140.80	1.63E-03	150.20	1.74E-03
RANCHO ZAPOTITO (CNA-B-30)	210	124.37	136.09	11.72	5.00	0.46	39.50	4.57E-04	26.40	3.06E-04
EL CARACOL (CNA-B-114)	150	38.92	80.01	41.09	17.50	0.42	24.10	2.79E-04	29.12	3.37E-04
JUCHIPILA (CNA-B-315)	150	85.72	117.58	31.86	6.60	0.20	16.80	1.94E-04	10.43	1.21E-04

Tabla 4.1. Resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo de BETSCO por el método de Cooper-Jacob. BETSCO (2005).

Para un mayor nivel de precisión y mejorar la calidad de los resultados, dentro del proyecto se volvió a efectuar la interpretación de las pruebas de bombeo realizados por BETSCO. El Ing. Arias Paz perteneciente al grupo de hidrogeología de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, aplicó los métodos de solución: Theis (abatimiento y recuperación) (Theis, 1935), Cooper-Jacob (Cooper Jr and Jacob, 1946), Walton (Walton, 1990) y Neuman (Neuman and Witherspoon, 1969). Las interpretaciones se muestran en la Tabla 4.2.

POZO	P.T. [m]	P.N.E. [m]	P.N.D. [m]	ABAT. [m]	TRANSMISIVIDAD [m ² /d]					
					Theis (Abat)	Theis (Rec)	Cooper-Jacob	Walton	Neuman	Rushton
AGUA BLANCA (CNA-B-291)	130	27.00	28.67	1.67	112.00	113.00	123.00	117.00	105.00	288.40
EL RODEO (CNA-B-189)	170	47.38	67.64	20.26	123.00	184.00	132.00	99.70	91.50	184.50
RANCHO ZAPOTITO (CNA-B-30)	210	124.37	136.09	11.72	45.40	26.20	45.30	29.10	14.40	55.90
EL CARACOL (CNA-B-114)	150	38.92	80.01	41.09	31.40	36.30	22.20	21.50	12.50	55.50
JUCHIPILA (CNA-B-315)	150	85.72	117.58	31.86	25.60	14.00	22.80	14.00	6.90	25.08

Tabla 4.2. Resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo de BETSCO por diversos métodos. Facultad de Ingeniería, UNAM. (2017).

Con el fin de comparar y contrastar resultados, el autor también realizó interpretaciones empleando el método de solución analítico de Cooper-Jacob (Cooper Jr and Jacob, 1946), así como los métodos de Hantush (Hantush, 1960), Tartakovsky-Neuman (Tartakovsky and Neuman, 2007), Theis (abatimiento) (Theis, 1935) y Moench (Moench, 1997) con el software AQTESOLV Pro (Glenn M, 2007).

Los resultados obtenidos con estas metodologías analíticas fueron principalmente: Transmisividad [T] y Conductividad hidráulica [K]. Desde la Figura 4.5 hasta la Figura 4.10, se presentan los resultados gráficos de las interpretaciones realizadas con Cooper-Jacob

PRUEBA DE BOMBEO AGUA BLANCA		ETAPA	HORA [hh:mm:ss]	TIEMPO [min]	T. ACUM. [min]	P.N.D. [m]	ABATIM. [m]
Fecha:	19/10/2005	ABATIMIENTO [m]	-	0	0	27.00	0.00
Localidad:	Agua Blanca		-	0.25	0.25	27.15	0.15
Municipio:	-		-	0.50	0.50	27.30	0.30
Estado:	Zacatecas		-	1	1	27.44	0.44
Pozo de bombeo:	CNA-B-291		-	2	2	27.64	0.64
X [UTM]:	717151		-	4	4	27.83	0.83
Y [UTM]:	2431137		-	8	8	27.94	0.94
Z [msnm]:	1574.35		-	10	10	28.01	1.01
P.T. [m]:	130		-	12	12	28.01	1.01
Ø Perf. [inch]:	22 *		-	15	15	28.06	1.06
Ø Ademe [inch]:	10		-	30	30	28.10	1.10
Ø Tubo desc. [inch]:	2		-	60	60	28.14	1.14
Prof. Scr. Top. [m]:	27 *		-	90	90	28.17	1.17
Prof. Scr. Bas. [m]:	130 *		-	120	120	28.20	1.20
Long. Scr. [m]:	103 *		-	150	150	28.20	1.20
P.N.E. [m]:	27		-	180	180	28.25	1.25
P.N.D. Max [m]:	28.67		-	210	210	28.27	1.27
Abat. Max [m]:	1.67		-	240	240	28.27	1.27
Espesor penetr. [m]:	103		-	270	270	28.27	1.27
Q [l/s]:	4		-	300	300	28.27	1.27
Qe [l/s/m]:	39		-	330	330	28.31	1.31
Temp. [°C]:	-		-	360	360	28.34	1.34
Abat. Durac. [min]:	720		-	390	390	28.34	1.34
Recup. Durac. [min]:	30		-	420	420	28.36	1.36
Duración total [min]:	750		-	450	450	28.36	1.36
Pozo de observ.:	-		-	480	480	28.38	1.38
X [UTM]:	-		-	510	510	28.38	1.38
Y [UTM]:	-	-	540	540	27.00		
Z [msnm]:	-	-	570	570	27.00		
Dist. Al P.B. [m]:	-	-	600	600	28.49	1.49	
P.T. [m]:	-	-	630	630	28.49	1.49	
Ø Perf. [inch]:	-	-	660	660	28.49	1.49	
Ø Ademe [inch]:	-	-	690	690	28.51	1.51	
Ø Tubo desc. [inch]:	-	-	720	720	28.67	1.67	
Prof. Scr. Top. [m]:	-	RECUPERACIÓN [m]	-	0.25	720.25	28.28	1.28
Prof. Scr. Bas. [m]:	-		-	0.50	720.50	28.12	1.12
Long. Scr. [m]:	-		-	1	721	27.92	0.92
P.N.E. [m]:	-		-	2	722	27.76	0.76
P.N.D. Max [m]:	-		-	4	724	27.59	0.59
Observaciones:			-	8	728	27.09	0.09
			-	10	730	27.09	0.09
			-	12	732	27.09	0.09
			-	15	735	27.09	0.09
			-	30	750	27.09	0.09

* Dato estimado

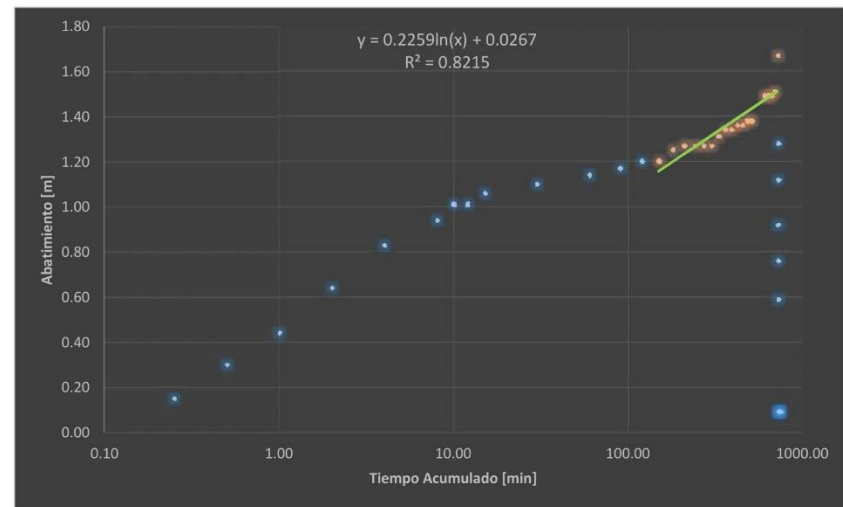
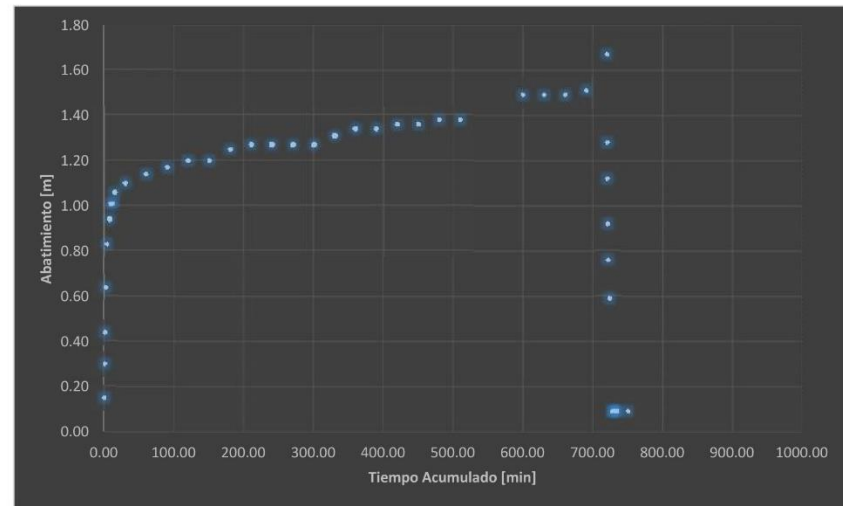


Fig. 4.5. Prueba de bombeo del pozo Agua Blanca (BETSCO, 2005) y relaciones tiempo-abatimiento.

PRUEBA DE BOMBEO	EL CARACOL
Fecha:	19/10/2005
Localidad:	El Caracol
Municipio:	-
Estado:	Zacatecas
Pozo de bombeo:	CNA-B-114
X [UTM]:	723635
Y [UTM]:	2401360
Z [msnm]:	1581.55
P.T. [m]:	150
Ø Perf. [inch]:	22 *
Ø Ademe [inch]:	12
Ø Tubo desc. [inch]:	8
Prof. Scr. Top. [m]:	38.92 *
Prof. Scr. Bas. [m]:	150 *
Long. Scr. [m]:	111.08 *
P.N.E. [m]:	38.92
P.N.D. Max [m]:	80.01
Abat. Max [m]:	41.09
Espesor penetr. [m]:	111.08
Q [l/s]:	17.5
Qe [l/s/m]:	0.42
Temp. [°C]:	-
Abat. Durac. [min]:	720
Recup. Durac. [min]:	60
Duración total [min]:	780
Pozo de observ.:	-
X [UTM]:	-
Y [UTM]:	-
Z [msnm]:	-
Dist. Al P.B. [m]:	-
P.T. [m]:	-
Ø Perf. [inch]:	-
Ø Ademe [inch]:	-
Ø Tubo desc. [inch]:	-
Prof. Scr. Top. [m]:	-
Prof. Scr. Bas. [m]:	-
Long. Scr. [m]:	-
P.N.E. [m]:	-
P.N.D. Max [m]:	-
Observaciones:	

* Dato estimado

ETAPA	HORA [hh:mm:ss]	TIEMPO [min]	T. ACUM. [min]	P.N.D. [m]	ABATIM. [m]
ABATIMIENTO [m]	-	0	0	38.92	0.00
	-	0.50	0.50	45.03	6.11
	-	1.00	1.00	50.43	11.51
	-	2	2	59.03	20.11
	-	4	4	67.23	28.31
	-	8	8	67.27	28.35
	-	10	10	65.00	26.08
	-	12	12	63.27	24.35
	-	15	15	62.07	23.15
	-	30	30	64.76	25.84
	-	60	60	69.50	30.58
	-	90	90	74.76	35.84
	-	120	120	76.57	37.65
	-	150	150	77.99	39.07
	-	180	180	78.48	39.56
	-	210	210	79.12	40.20
	-	240	240	79.75	40.83
	-	270	270	79.75	40.83
	-	300	300	80.12	41.20
	-	330	330	80.43	41.51
	-	360	360	79.65	40.73
	-	390	390	81.45	42.53
	-	420	420	81.45	42.53
	-	450	450	81.45	42.53
-	480	480	79.93	41.01	
RECUPERACIÓN [m]	-	510	510	79.83	40.91
	-	540	540	80.03	41.11
	-	570	570	80.18	41.26
	-	600	600	80.30	41.38
	-	630	630	79.82	40.90
	-	660	660	79.93	41.01
	-	690	690	80.23	41.31
	-	720	720	80.01	41.09
	-	1	721	60.91	21.99
	-	2	722	58.06	19.14
-	4.00	724.00	56.25	17.33	
-	8	728	53.38	14.46	
-	10	730	52.47	13.55	
-	12	732	51.79	12.87	
-	15	735	50.89	11.97	
-	30	750	48.31	9.39	
-	60	780	45.73	6.81	

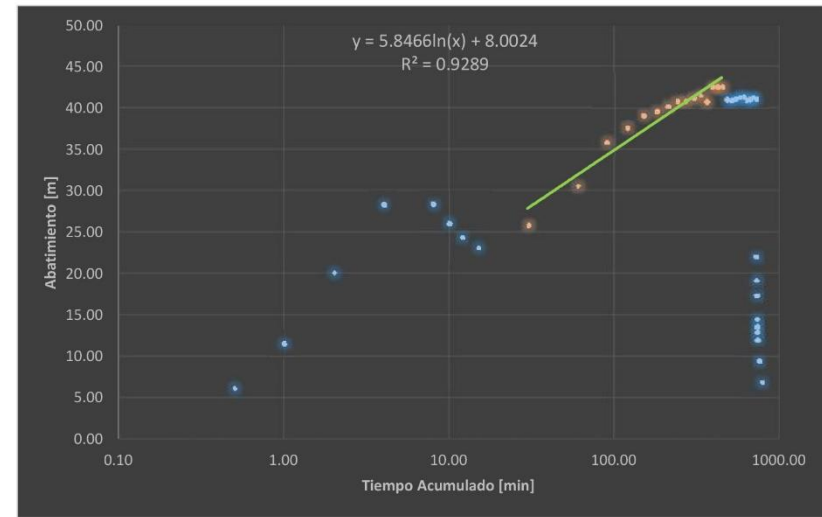
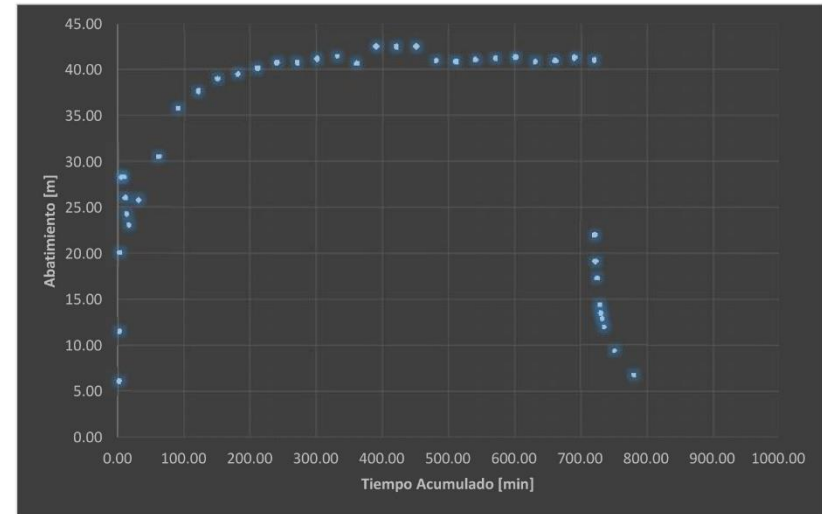


Fig. 4.6. Prueba de bombeo del pozo El Caracol (BETSCO, 2005) y relaciones tiempo-abatimiento.

PRUEBA DE BOMBEO	R. ZAPOTITO
Fecha:	20/10/2005
Localidad:	Rancho Zapotito
Municipio:	-
Estado:	Zacatecas
Pozo de bombeo:	CNA-B-30
X [UTM]:	707004
Y [UTM]:	2393043
Z [msnm]:	1452
P.T. [m]:	210
Ø Perf. [inch]:	22 *
Ø Ademe [inch]:	12
Ø Tubo desc. [inch]:	6
Prof. Scr. Top. [m]:	124.37 *
Prof. Scr. Bas. [m]:	210 *
Long. Scr. [m]:	85.63 *
P.N.E. [m]:	124.37
P.N.D. Max [m]:	136.09
Abat. Max [m]:	11.72
Espesor penetr. [m]:	85.63
Q [l/s]:	5
Qe [l/s/m]:	0.46
Temp. [°C]:	-
Abat. Durac. [min]:	721
Recup. Durac. [min]:	180
Duración total [min]:	901
Pozo de observ.:	-
X [UTM]:	-
Y [UTM]:	-
Z [msnm]:	-
Dist. Al P.B. [m]:	-
P.T. [m]:	-
Ø Perf. [inch]:	-
Ø Ademe [inch]:	-
Ø Tubo desc. [inch]:	-
Prof. Scr. Top. [m]:	-
Prof. Scr. Bas. [m]:	-
Long. Scr. [m]:	-
P.N.E. [m]:	-
P.N.D. Max [m]:	-
Observaciones:	

* Dato estimado

ETAPA	HORA [hh:mm:ss]	TIEMPO [min]	T. ACUM. [min]	P.N.D. [m]	ABATIM. [m]
ABATIMIENTO [m]	-	0	0	124.37	0.00
	-	0.25	0.25	125.40	1.03
	-	0.50	0.50	125.65	1.28
	-	1	1	125.51	1.14
	-	2	2	125.62	1.25
	-	4	4	125.66	1.29
	-	8	8	127.95	3.58
	-	12	12	132.47	8.10
	-	15	15	132.66	8.29
	-	30	30	133.11	8.74
	-	60	60	133.84	9.47
	-	90	90	134.19	9.82
	-	120	120	134.46	10.09
	-	180	180	134.78	10.41
	-	240	240	135.03	10.66
	-	270	270	135.09	10.72
	-	300	300	135.13	10.76
	-	330	330	135.19	10.82
	-	360	360	135.29	10.92
	-	390	390	135.39	11.02
	-	420	420	135.52	11.15
-	480	480	135.58	11.20	
-	510	510	135.64	11.27	
-	540	540	135.71	11.34	
-	570	570	135.71	11.34	
-	690	690	135.90	11.53	
-	721	721	136.09	11.72	
RECUPERACIÓN [m]	-	1.00	722.00	133.28	8.91
	-	2.00	723.00	132.47	8.10
	-	4.00	725.00	131.52	7.15
	-	8.00	729.00	130.37	6.00
	-	15.00	736.00	129.04	5.03
	-	30.00	751.00	128.03	3.93
	-	60.00	781.00	127.52	3.15
	-	90.00	811.00	127.21	2.84
-	120.00	841.00	126.09	2.53	
-	150.00	871.00	126.70	2.33	
-	180	901	126.52	2.15	

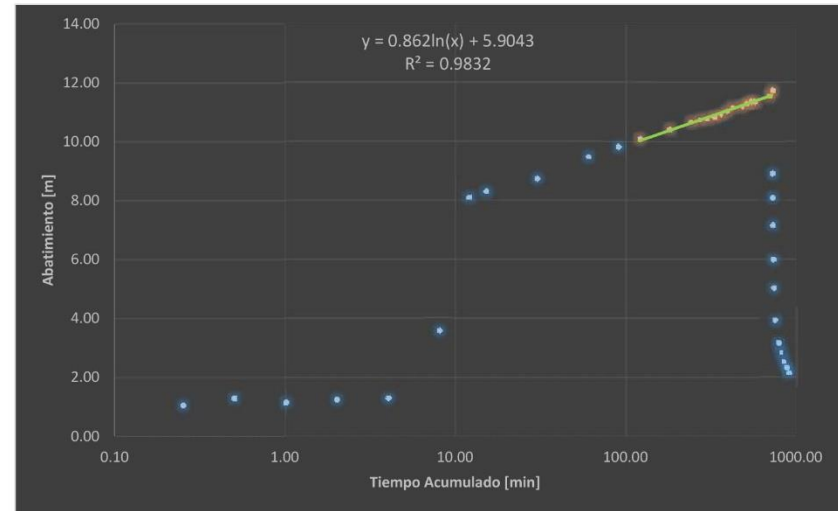
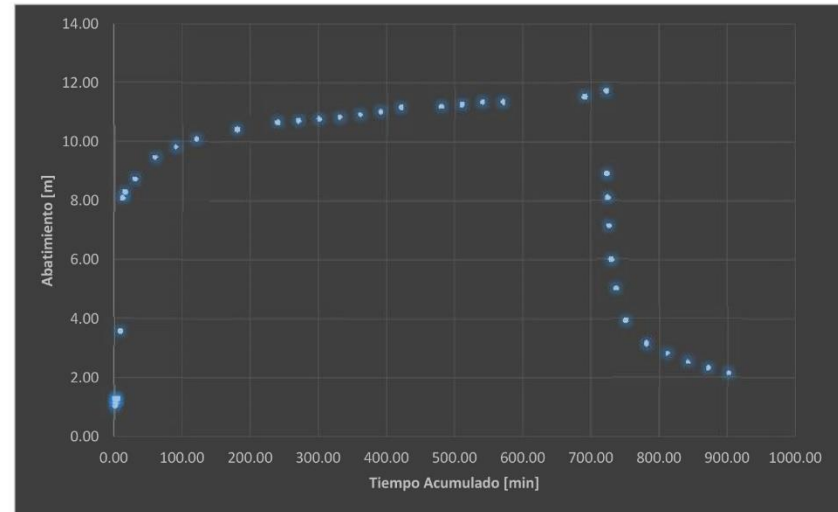


Fig. 4.9. Prueba de bombeo del pozo Rancho Zapotito (BETSCO, 2005) y relaciones tiempo-abatimiento.

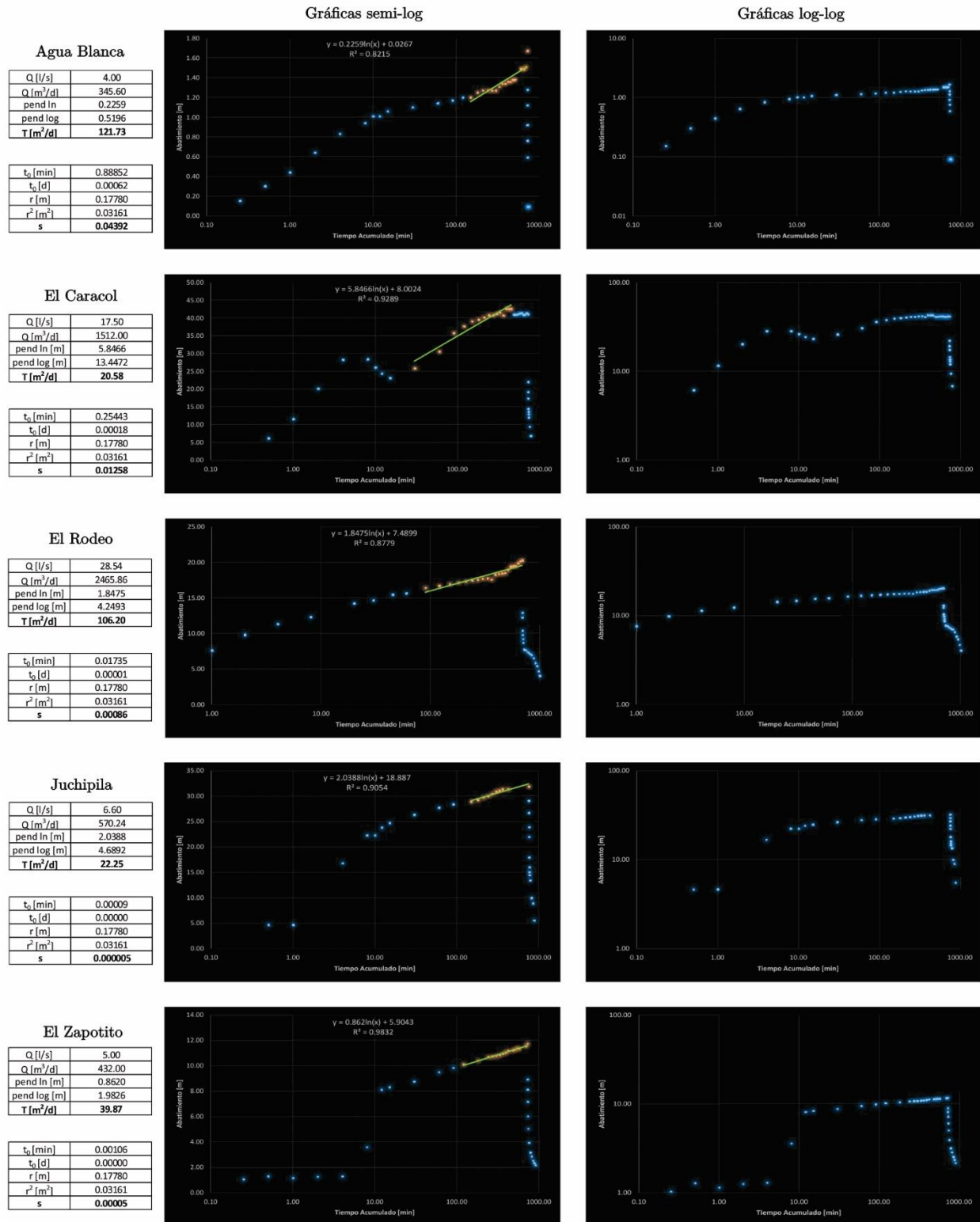


Fig. 4.10. Resultados gráficos de las interpretaciones realizadas por el autor, de las pruebas de bombeo de BETSCO (2005), utilizando método de Cooper-Jacob.

POZO	P.T. [m]	P.N.E. [m]	P.N.D. [m]	ABAT. [m]	Q [l/s]	Q. E. [l/s/m]	TRANSM. BOMBEO		TRANSM. RECUP.	
							T [m ² /d]	T [m ² /s]	T [m ² /d]	T [m ² /s]
AGUA BLANCA (CNA-B-291)	130	27.00	28.67	1.67	4.00	2.40	121.73	1.41E-03	129.12	1.49E-03
EL RODEO (CNA-B-189)	170	47.38	67.64	20.26	28.54	1.41	106.20	1.23E-03	122.20	1.41E-03
RANCHO ZAPOTITO (CNA-B-30)	210	124.37	136.09	11.72	5.00	0.43	39.87	4.62E-04	46.70	5.41E-04
EL CARACOL (CNA-B-114)	150	38.92	80.01	41.09	17.50	0.43	20.58	2.38E-04	24.10	2.79E-04
JUCHIPILA (CNA-B-315)	150	85.72	117.58	31.86	6.60	0.21	22.25	2.58E-04	21.90	2.53E-04

Tabla 4.3. Resultados de las interpretaciones realizadas por el autor, de las pruebas de bombeo de BETSCO (2005), utilizando método de Cooper-Jacob.

De los resultados de la interpretación efectuada por el autor, se obtuvieron valores de transmisividad que varían entre 1.49×10^{-3} [m²/s] y 2.53×10^{-4} [m²/s] (129.12 a 21.9 [m²/d]). Tomando en cuenta un espesor saturado promedio de 100 [m], los valores de conductividad hidráulica varían entre 2.7×10^{-5} y 1.6×10^{-6} [m/s] (2.3 a 0.14 [m/d]). De la Figura 4.11 a la Figura 4.15 se muestran los resultados gráficos de las interpretaciones efectuadas con AQTESOLV.

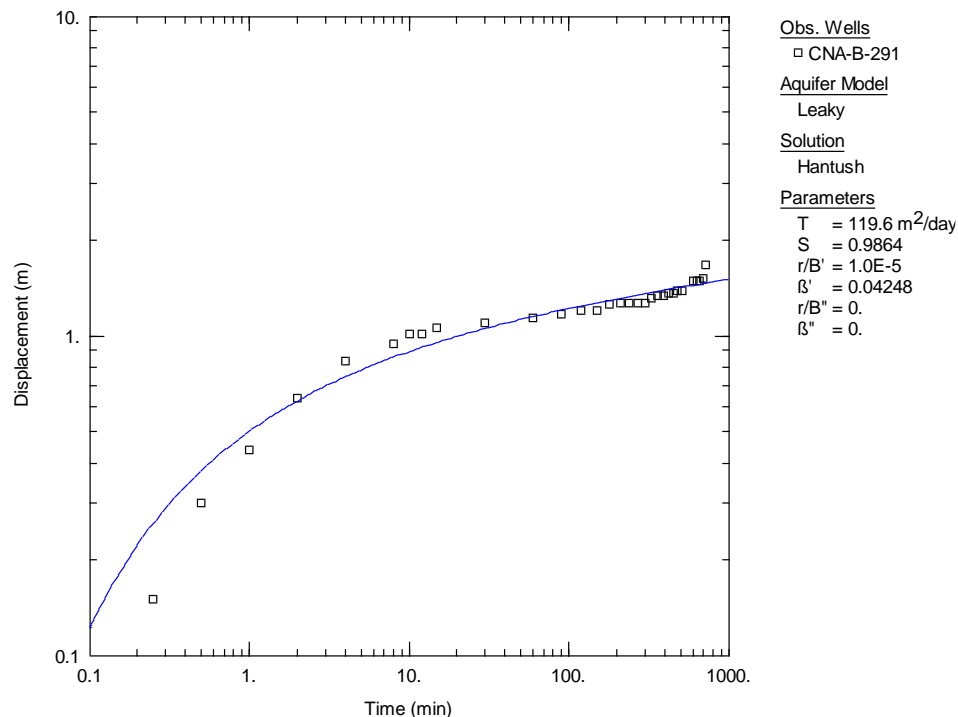


Fig. 4.11. Interpretación y resultados obtenidos por el autor, de prueba de bombeo de BETSCO del pozo Agua Blanca (CNA-B-291), con AQTESOLV Pro (Glenn M, 2007).

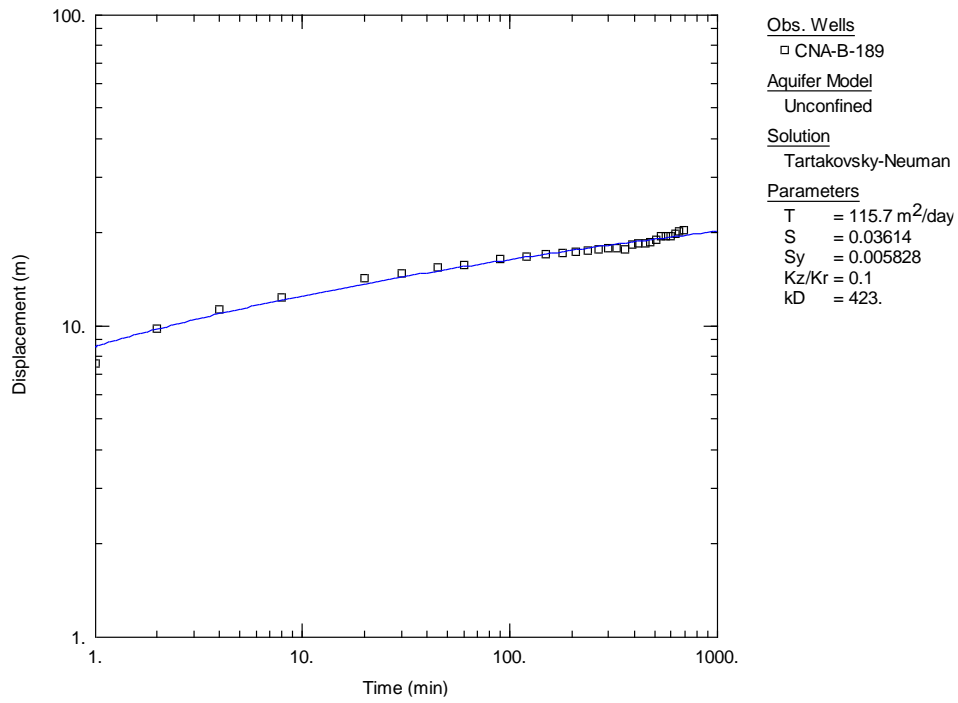


Fig. 4.12. Interpretación y resultados obtenidos por el autor, de prueba de bombeo de BETSCO del pozo El Rodeo (CNA-B-189) con AQTESOLV Pro (Glenn M, 2007).

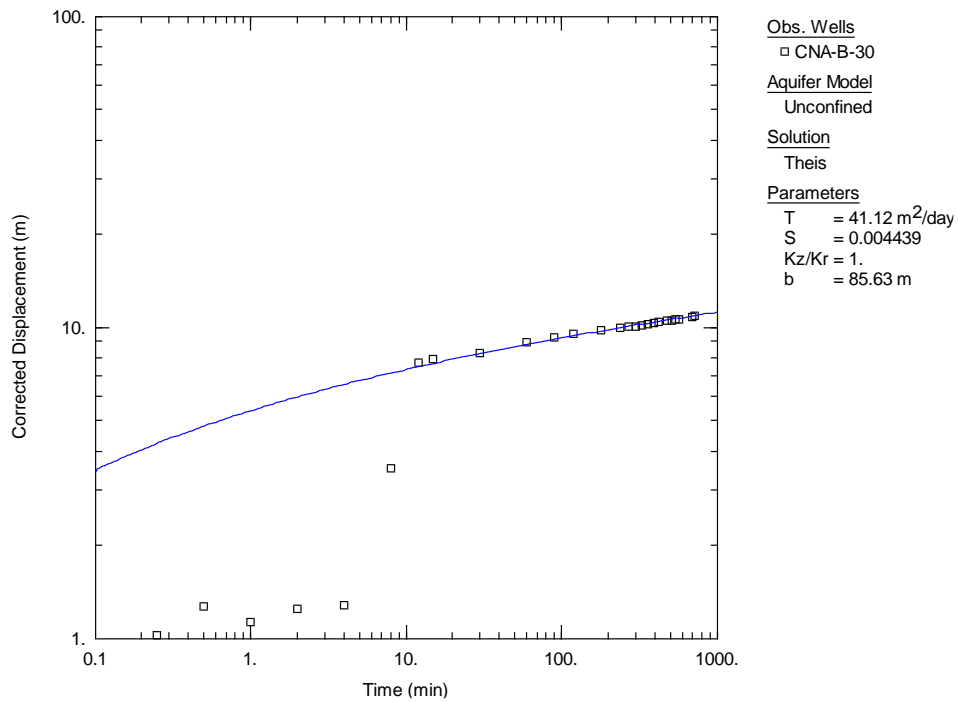


Fig. 4.13. Interpretación y resultados obtenidos por el autor, de prueba de bombeo de BETSCO del pozo Rancho Zapotito (CNA-B-30) con AQTESOLV Pro (Glenn M, 2007).

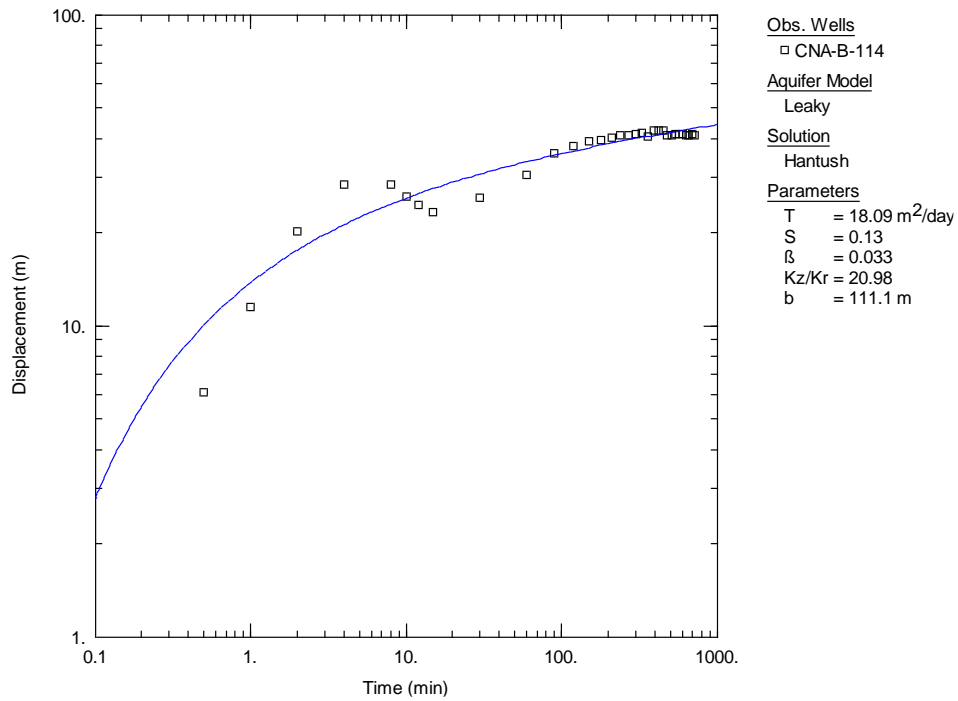


Fig. 4.14. Interpretación y resultados obtenidos por el autor, de prueba de bombeo de BETSCO del pozo El Caracol (CNA-B-114) con AQTESOLV Pro (Glenn M, 2007).

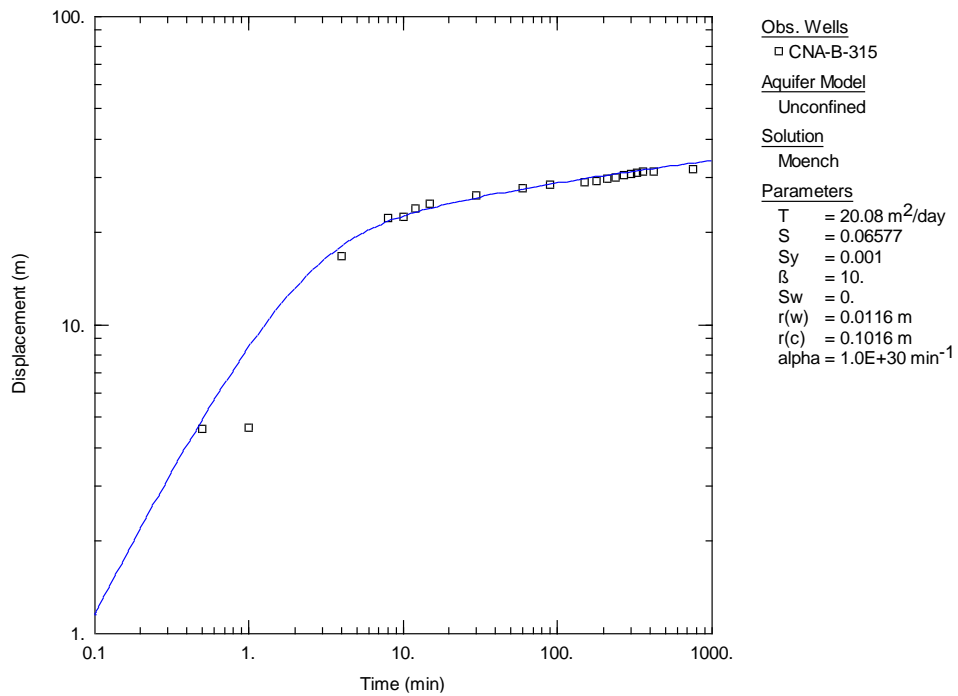


Fig. 4.15. Interpretación y resultados obtenidos por el autor, de prueba de bombeo de BETSCO del pozo Juchipila (CNA-B-315) con AQTESOLV Pro (Glenn M, 2007).

POZO	P.T. [m]	P.N.E. [m]	P.N.D. [m]	ABAT. [m]	Q [l/s]	Q. E. [l/s/m]	TRANSMISIVIDAD		s	MÉTODO
							T [m ² /d]	T [m ² /s]		
AGUA BLANCA (CNA-B-291)	130	27.00	28.67	1.67	4.00	2.40	119.60	1.38E-03	0.98640	Hantush
EL RODEO (CNA-B-189)	170	47.38	67.64	20.26	28.54	1.41	115.70	1.34E-03	0.03614	Tartakovsky - Neuman
RANCHO ZAPOTITO (CNA-B-30)	210	124.37	136.09	11.72	5.00	0.43	41.12	4.76E-04	0.00444	Theis
EL CARACOL (CNA-B-114)	150	38.92	80.01	41.09	17.50	0.43	18.09	2.09E-04	0.13000	Hantush
JUCHIPILA (CNA-B-315)	150	85.72	117.58	31.86	6.60	0.21	20.08	2.32E-04	0.06577	Moench

Tabla 4.4. Resultados de las interpretaciones efectuadas por el autor, de las pruebas de bombeo de BETSCO por diversos métodos con AQTESOLV Pro.

Los valores de transmisividad y conductividad hidráulica son, en general, bajos, debido al tipo de litologías consolidadas y granulometría fina de las rocas que conforman el acuífero, como lo confirman los caudales específicos de algunos pozos, los cuales varían de 0.21 [l/s/m] y máximo de 2.4 [l/s/m]. Ninguna prueba de bombeo contó con pozo de observación por lo que no fue posible estimar de forma precisa valor del coeficiente de almacenamiento, por tal motivo los valores obtenidos son aproximados.

En la Tabla 4.5 se expone una comparativa de los resultados de todas las interpretaciones, en esta tabla cabe destacar que, tanto para los resultados de transmisividad reportados por la F.I. Como para los mencionados por el autor, se hizo un promedio de los resultados de todos los métodos empleados, con el fin de obtener un valor representado por la media aritmética y así, minimizar el rango de error que puede existir dentro del mismo.

POZO	P.T. [m]	P.N.E. [m]	P.N.D. [m]	ABAT. [m]	Q [l/s]	Q. E. [l/s/m]	TRANSMISIVIDAD [m ² /d]					
							ABATIMIENTO			RECUPERACIÓN		
							BETSCO (2005)	F.I. (2017)	Autor (2019)	BETSCO (2005)	F.I. (2017)	Autor (2019)
AGUA BLANCA (CNA-B-291)	130	27.00	28.67	1.67	4.00	2.40	252.98	114.00	120.66	210.82	113.00	129.12
EL RODEO (CNA-B-189)	170	47.38	67.64	20.26	28.54	1.41	140.80	111.00	110.95	150.20	184.00	122.20
RANCHO ZAPOTITO (CNA-B-30)	210	124.37	136.09	11.72	5.00	0.43	39.50	33.50	40.50	26.40	26.20	46.70
EL CARACOL (CNA-B-114)	150	38.92	80.01	41.09	17.50	0.43	24.10	21.90	19.33	29.12	36.30	24.10
JUCHIPILA (CNA-B-315)	150	85.72	117.58	31.86	6.60	0.21	16.80	17.30	21.17	10.43	14.00	21.90

Tabla 4.5. Comparación entre resultados de transmisividad de pruebas de bombeo de BETSCO (2015).

De la Fig. 4.17 a la Fig. 4.27 se muestran los resultados de las correlaciones de los modelos de inversión de Occam y Bostick, con los aprovechamientos que se encontraran ubicados hasta a 5 [km] de distancia del punto del sondeo, dichas correlaciones se hicieron en función de la profundidad del nivel estático del aprovechamiento y con el objetivo de determinar la relación entre resistividad y la temperatura. Cabe mencionar que únicamente se incluyen los sondeos cuyo campo de influencia involucró a al menos 1 aprovechamiento útil.

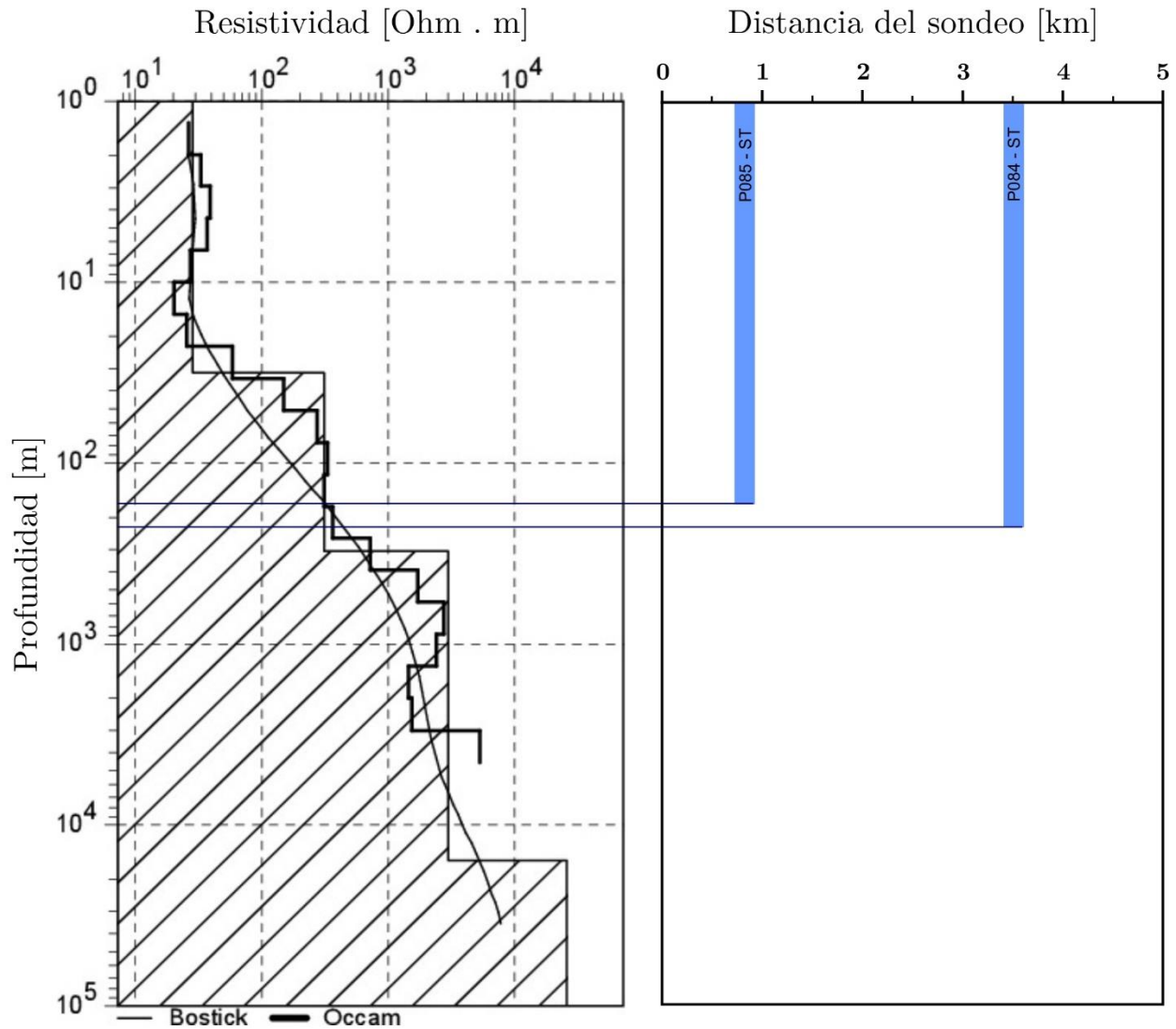


Fig. 4.17. Correlación del sondeo MT 1.5

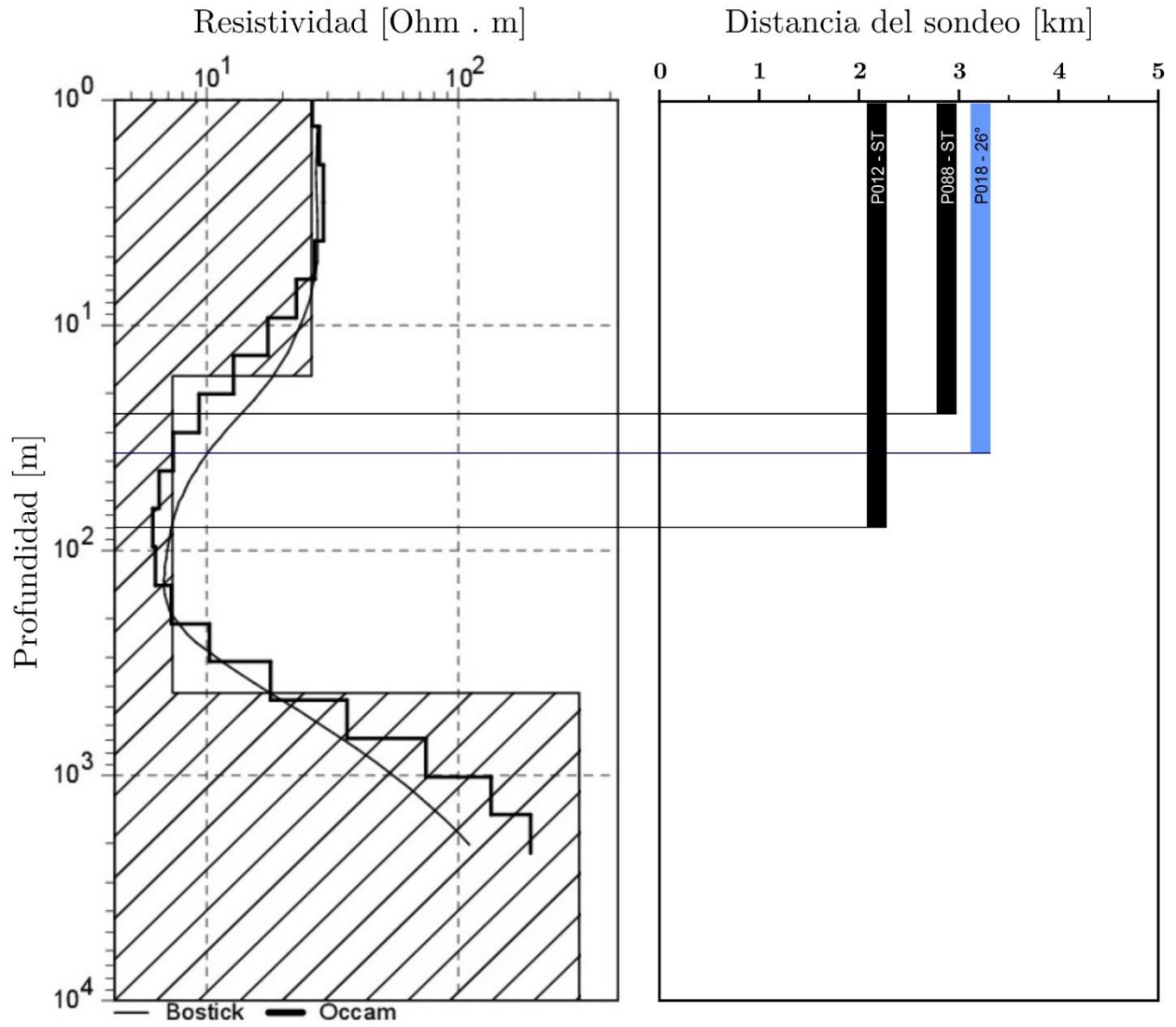


Fig. 4.18. Correlación del sondeo MT 1.7

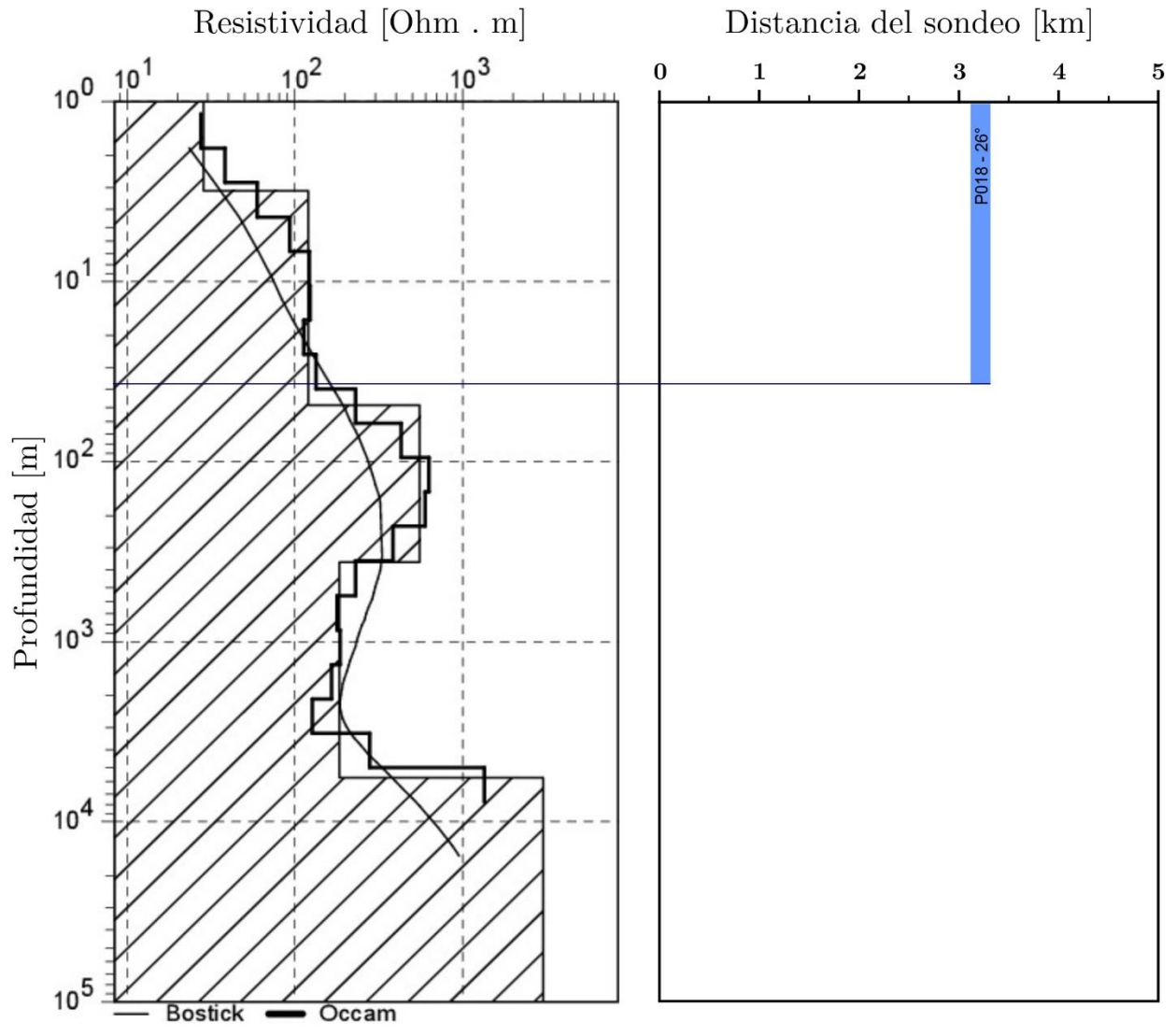


Fig. 4.19. Correlación del sondeo MT 1.8

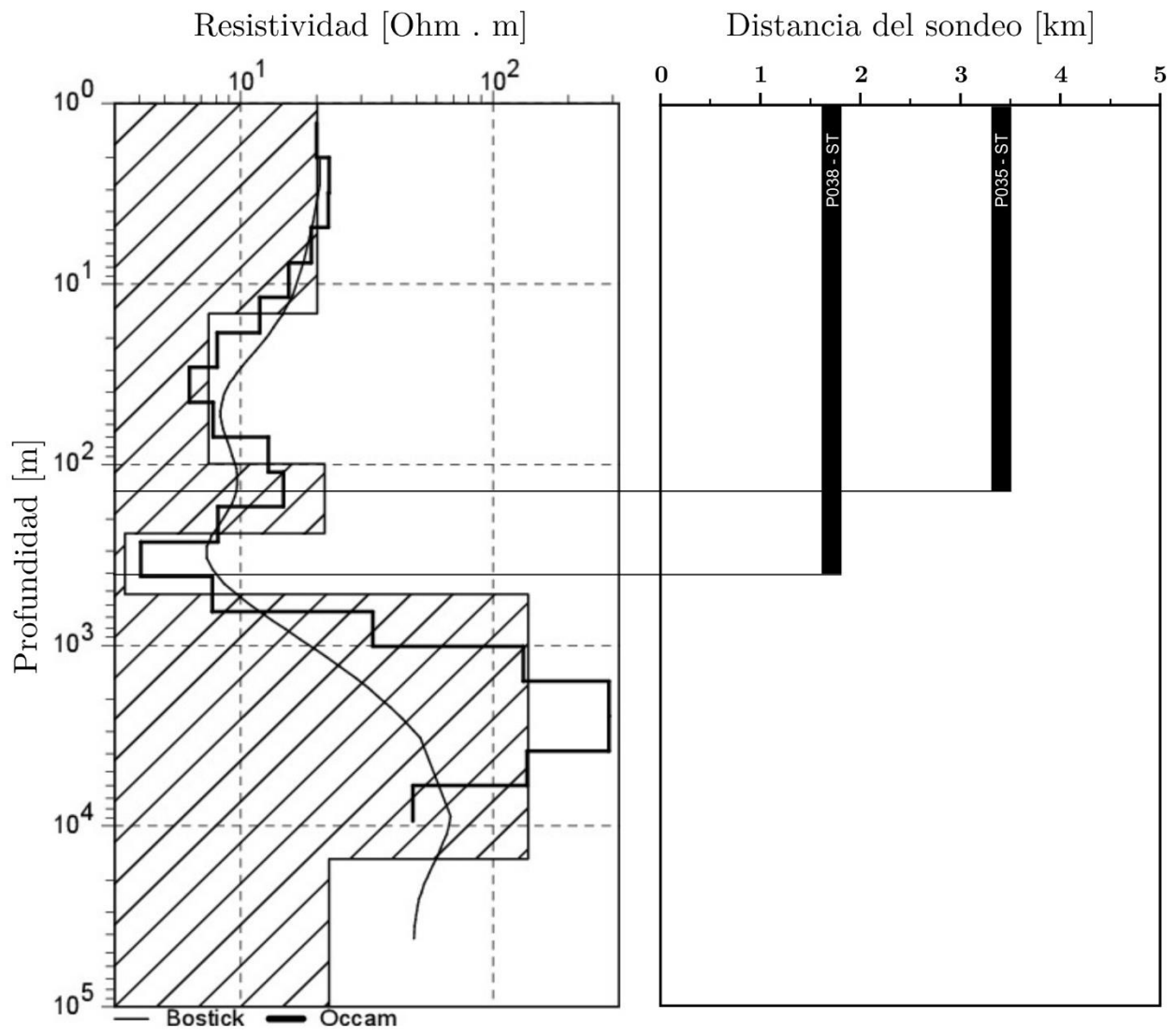


Fig. 4.20. Correlación del sondeo MT 2.5

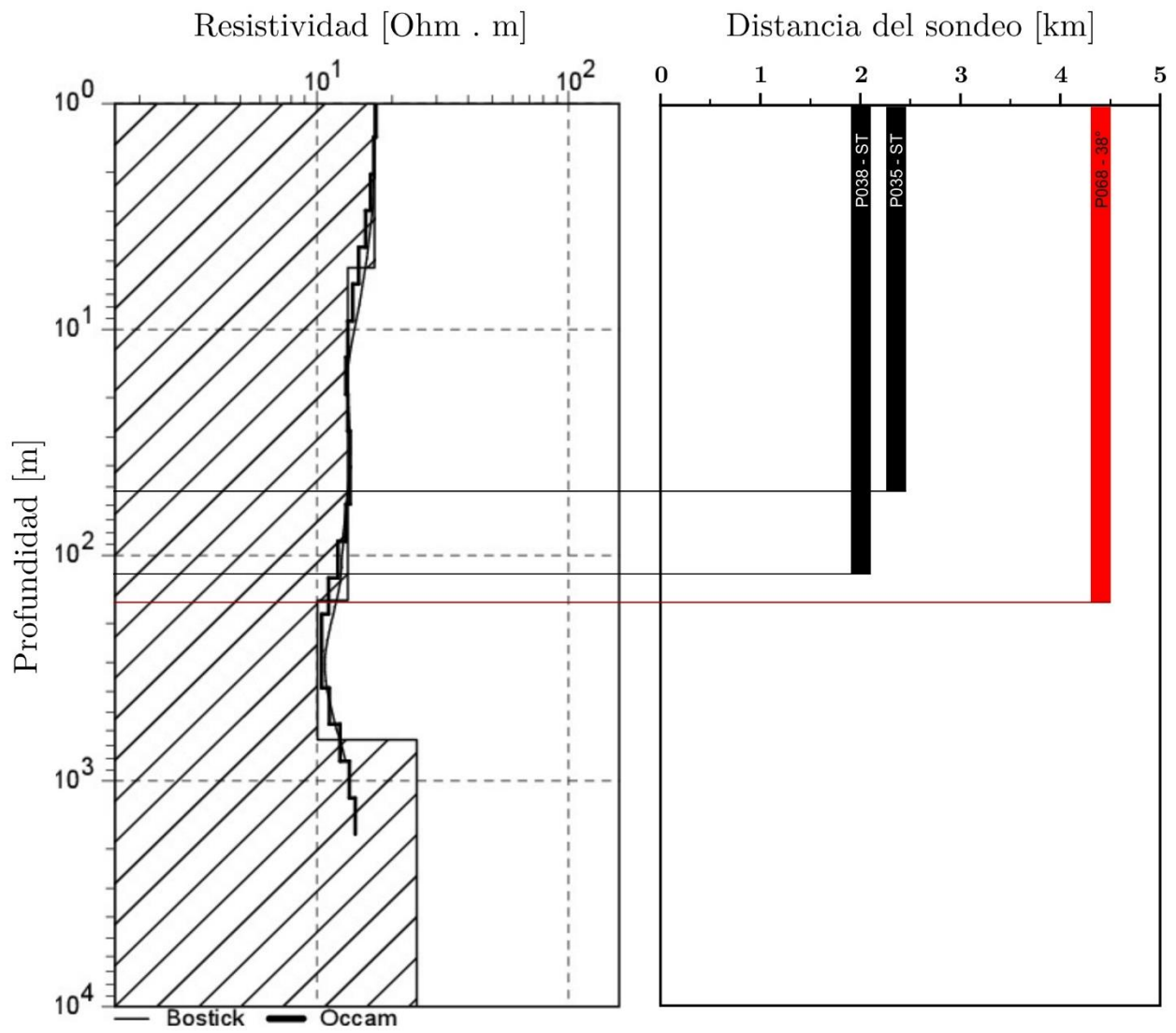


Fig. 4.21. Correlación del sondeo MT 2.6

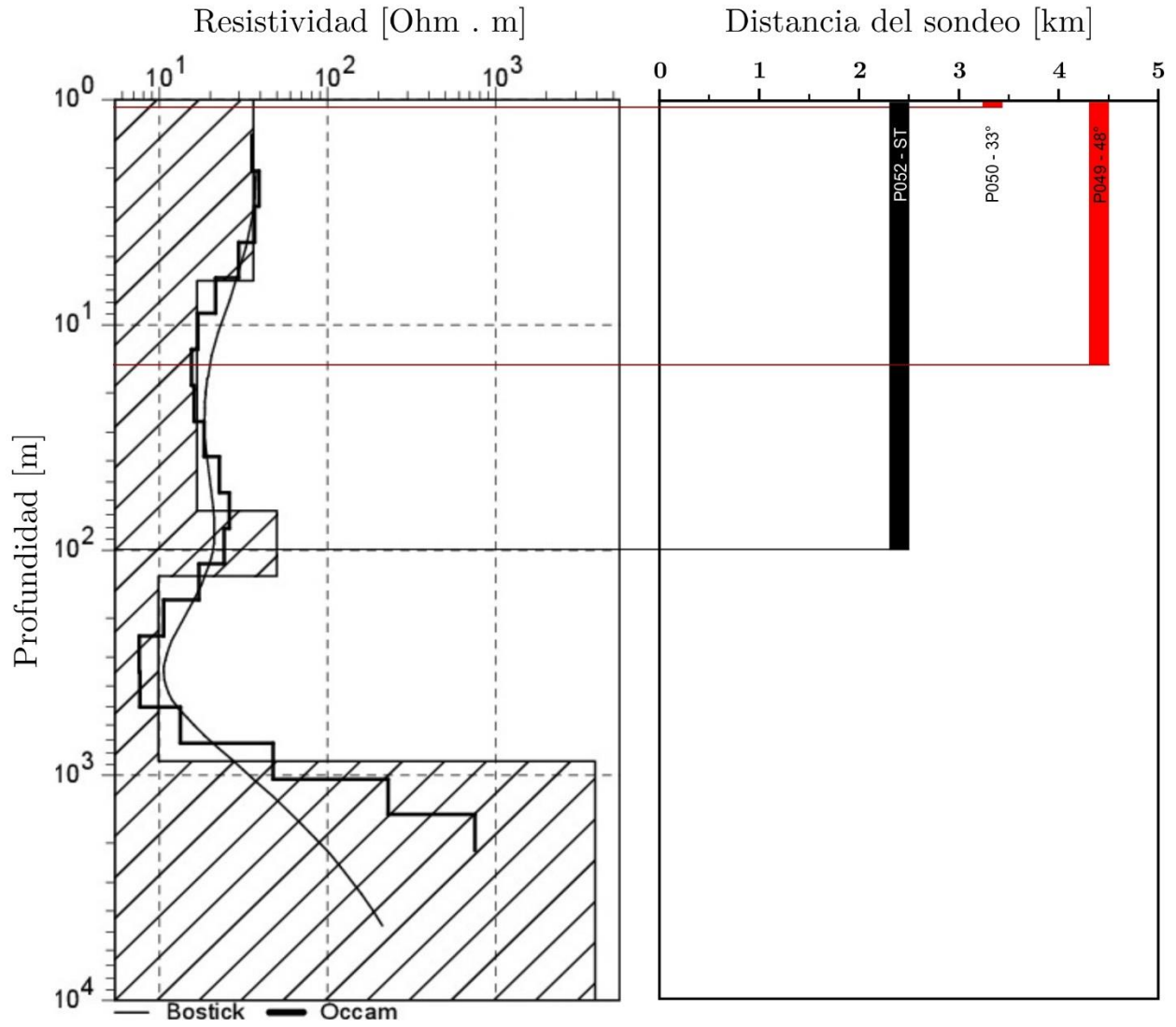


Fig. 4.22. Correlación del sondeo MT 3.4

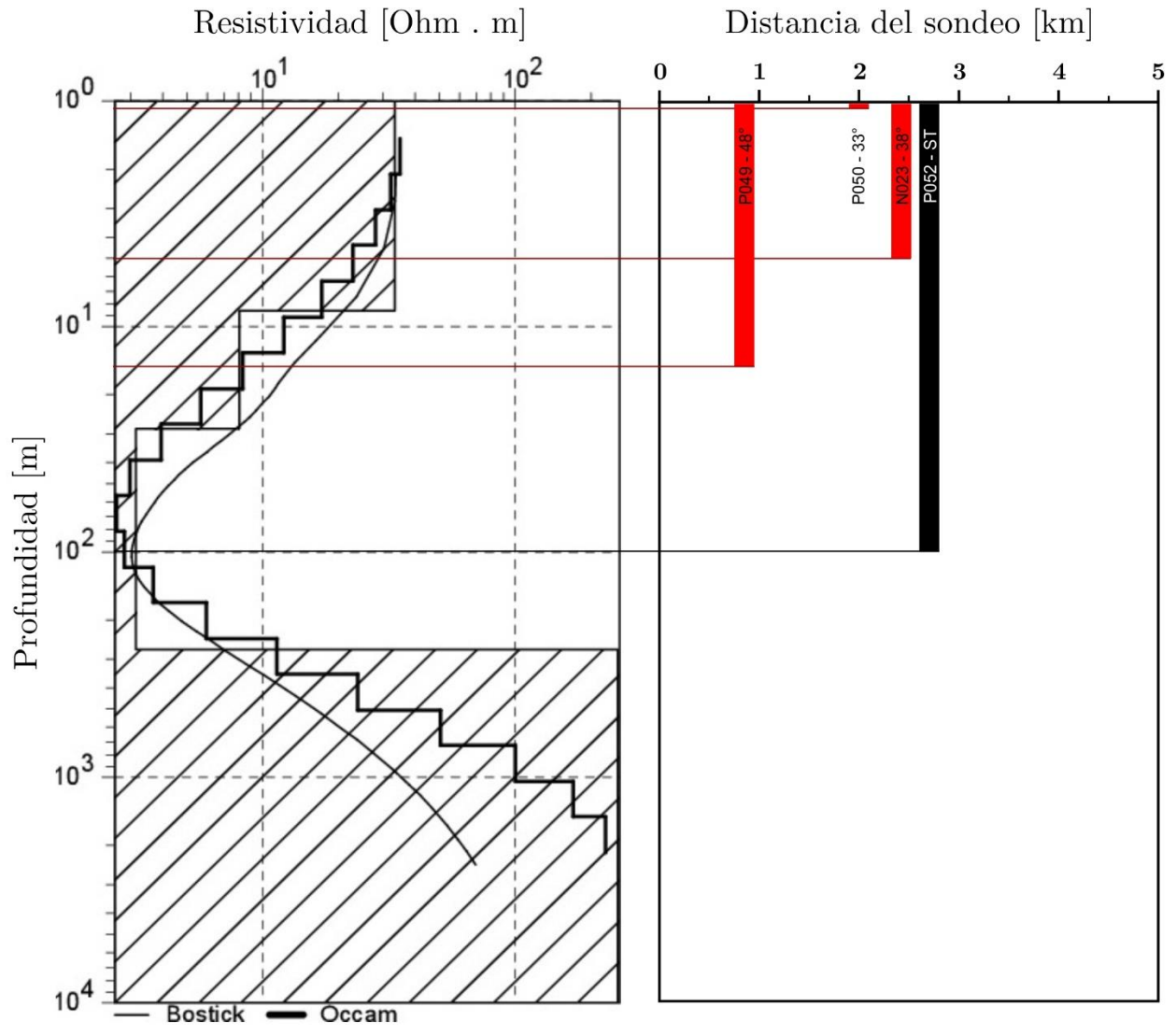


Fig. 4.23. Correlación del sondeo MT 3.5

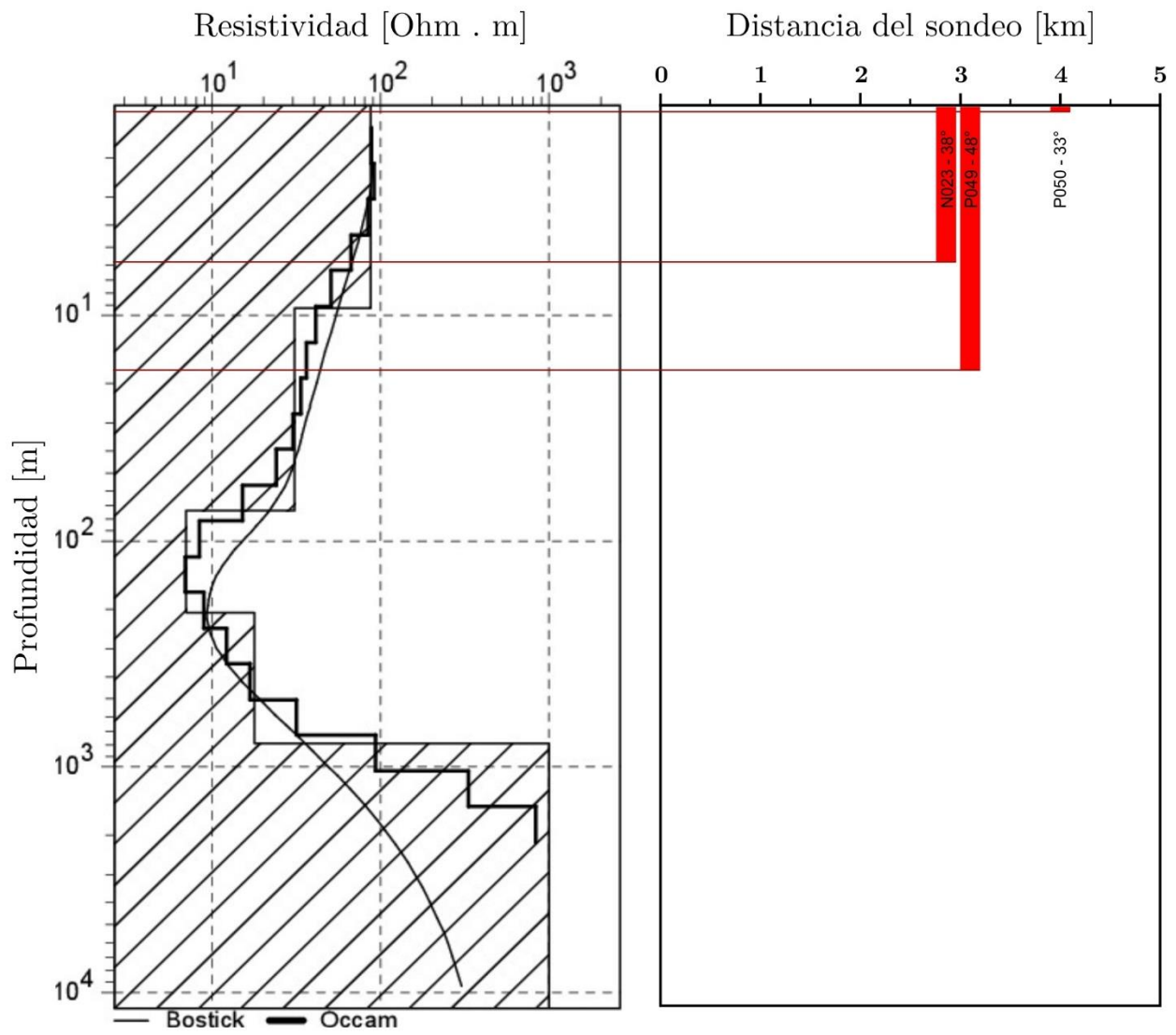


Fig. 4.24. Correlación del sondeo MT 3.6

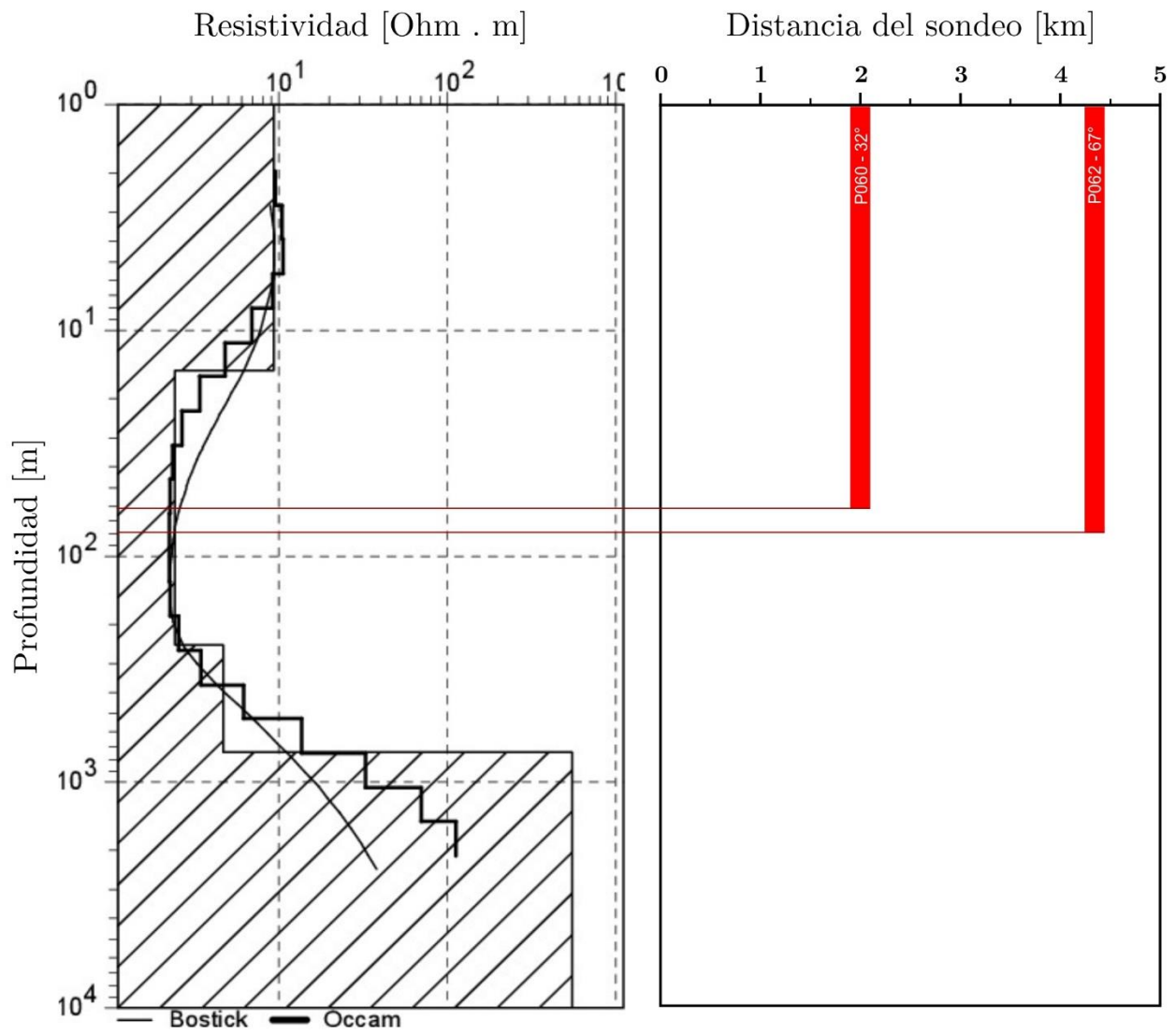


Fig. 4.25. Correlación del sondeo MT 4.4

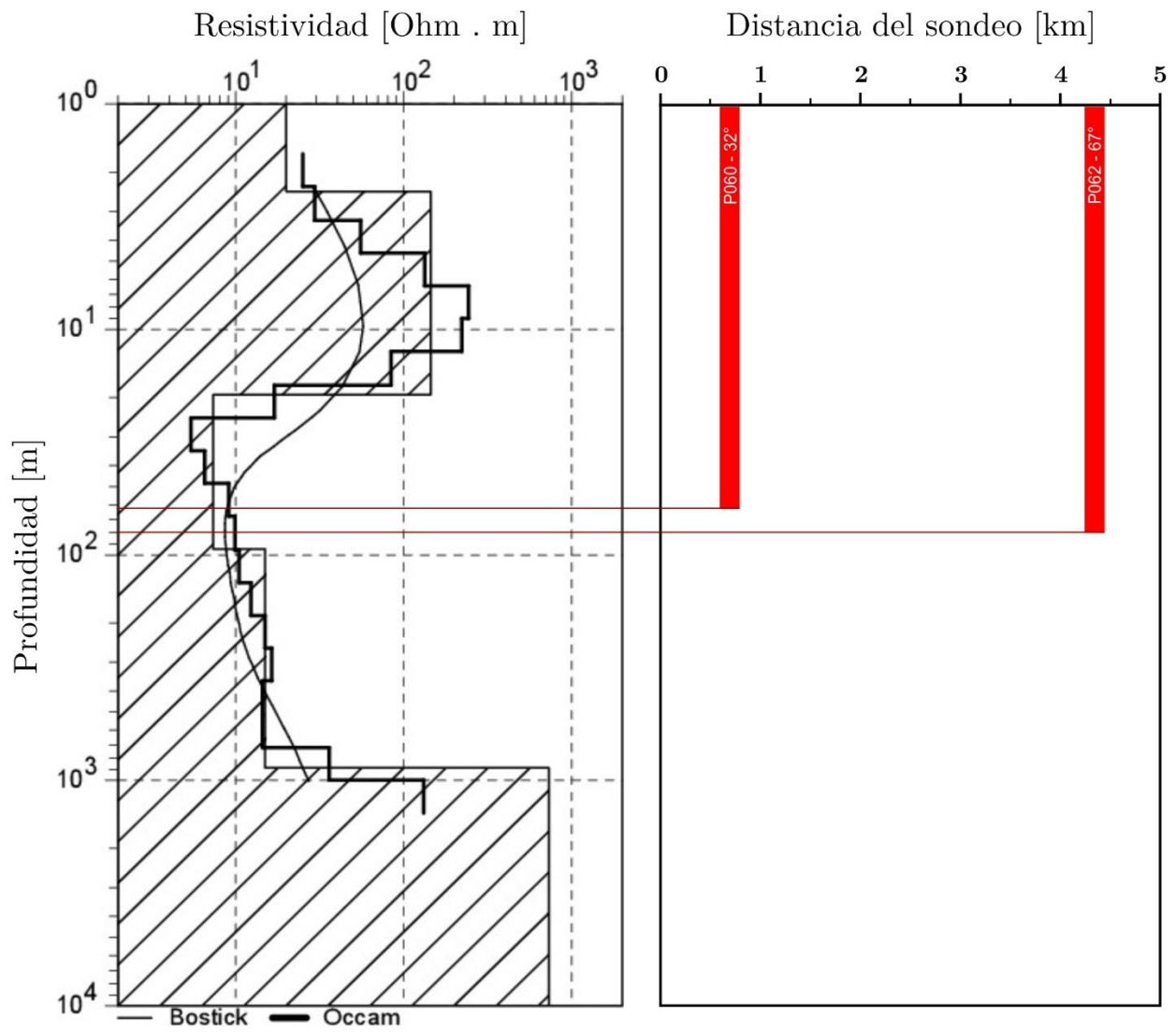


Fig. 4.26. Correlación del sondeo MT 4.5

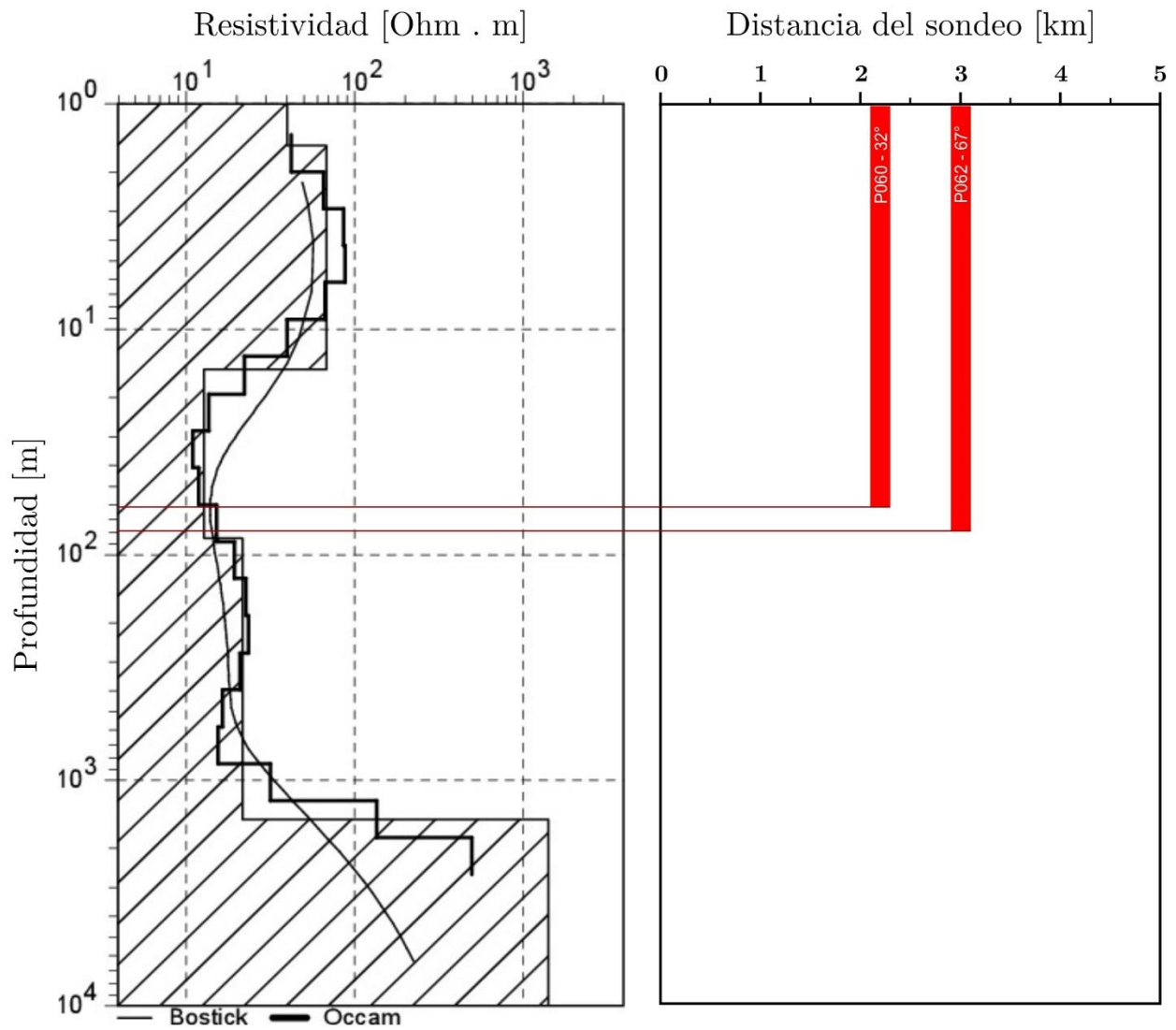


Fig. 4.27. Correlación del sondeo MT 4.6

Los resultados de las correlaciones se presentan en la Tabla 4.6. En ellos se puede apreciar que la relación entre resistividad es inversamente proporcional a la temperatura, consistente con la investigación de (Anderson *et al.*, 2000).

SONDEO MT	CVE_INT	DIST. SOND. [km]	TIPO	TEMP. [°C]	PROF. [m]	RESISTIVIDAD [ohm . m]
3.5	N023	2.4	Caliente	38	4.0	22.0
3.6	N023	2.8	Caliente	38	4.0	65.0
1.8	P018	3.2	Frio	26	37.0	150.0
3.4	P049	4.4	Caliente	48	16.0	17.0
3.5	P049	0.8	Caliente	48	16.0	8.0
3.6	P049	3.1	Caliente	48	16.0	40.0
3.4	P050	3.3	Caliente	33	-0.5	36.0
3.5	P050	2.0	Caliente	33	-0.5	34.0
3.6	P050	4.0	Caliente	33	-0.5	85.0
4.4	P060	2.0	Caliente	32	62.0	96.0
4.5	P060	0.7	Caliente	32	62.0	79.0
4.6	P060	2.2	Caliente	32	62.0	18.0
4.4	P062	4.3	Caliente	67	79.0	1.8
4.5	P062	4.3	Caliente	67	79.0	9.0
4.6	P062	3.0	Caliente	67	79.0	14.0
2.6	P068	4.4	Caliente	38	163.0	21.0
1.5	P084	3.5	Frio	22	220.0	180.0
1.5	P085	0.8	Frio	22	170.0	150.0

Tabla 4.6. Resultados de correlaciones de modelos 1D.

CVE_INT	DIST. PROM. [km]	TIPO	TEMP. [°C]	RESIST. PROM. [ohm . m]
N023	2.6	Caliente	38	43.5
P018	3.2	Frio	26	150.0
P049	2.8	Caliente	48	21.7
P050	3.1	Caliente	33	51.7
P060	1.6	Caliente	32	64.3
P062	3.9	Caliente	67	8.3
P068	4.4	Caliente	38	21.0
P084	3.5	Frio	21	180.0
P085	0.8	Frio	23	150.0

Tabla 4.7. Concentrado de aprovechamientos y sus resistividades promedio.

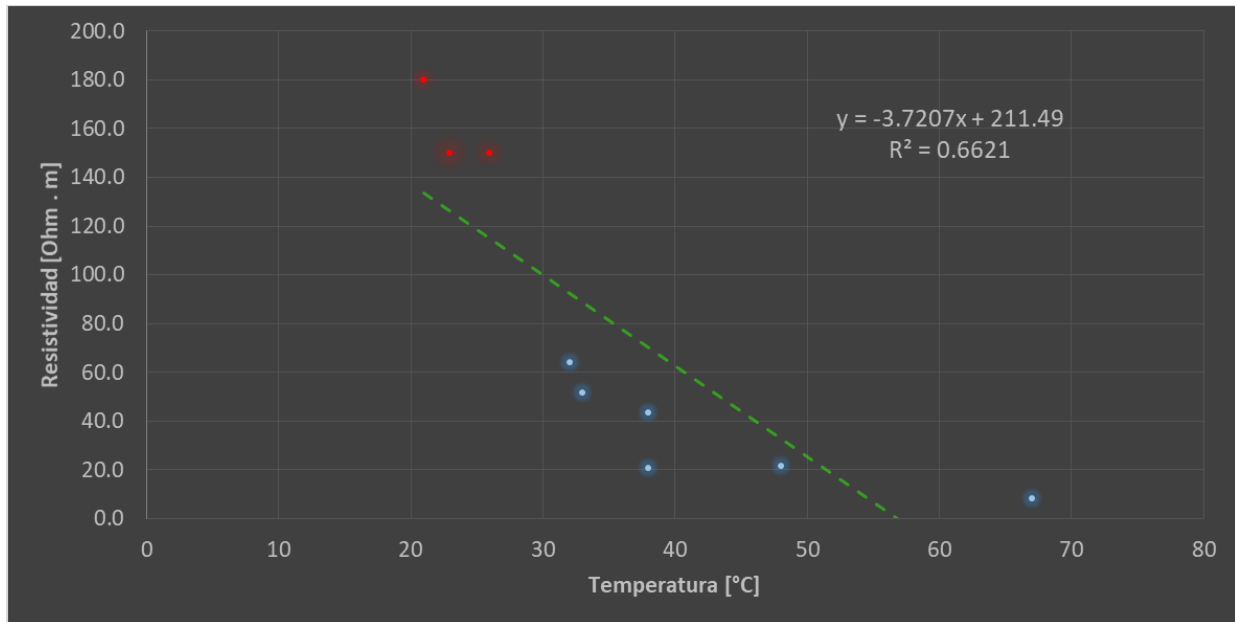


Fig. 4.28. Tendencia de la resistividad en función de la temperatura (línea punteada verde). Los aprovechamientos calientes se representan con los puntos rojos, mientras que, los aprovechamientos fríos son representados con los puntos azules.

Con los sondeos magnetoteléuricos que se realizaron también fue posible construir los perfiles geoelectricos que se presentan en las Figs. 4.29, 4.31 y 4.33, dichos perfiles fueron analizados y segmentados por unidades geoelectricas, lamentablemente, estas son de poca utilidad debido al bajo grado de detalle que presentan en profundidades someras, que es precisamente donde se encuentra alojado el acuífero, dentro de los rangos de 0 a 220 [m].

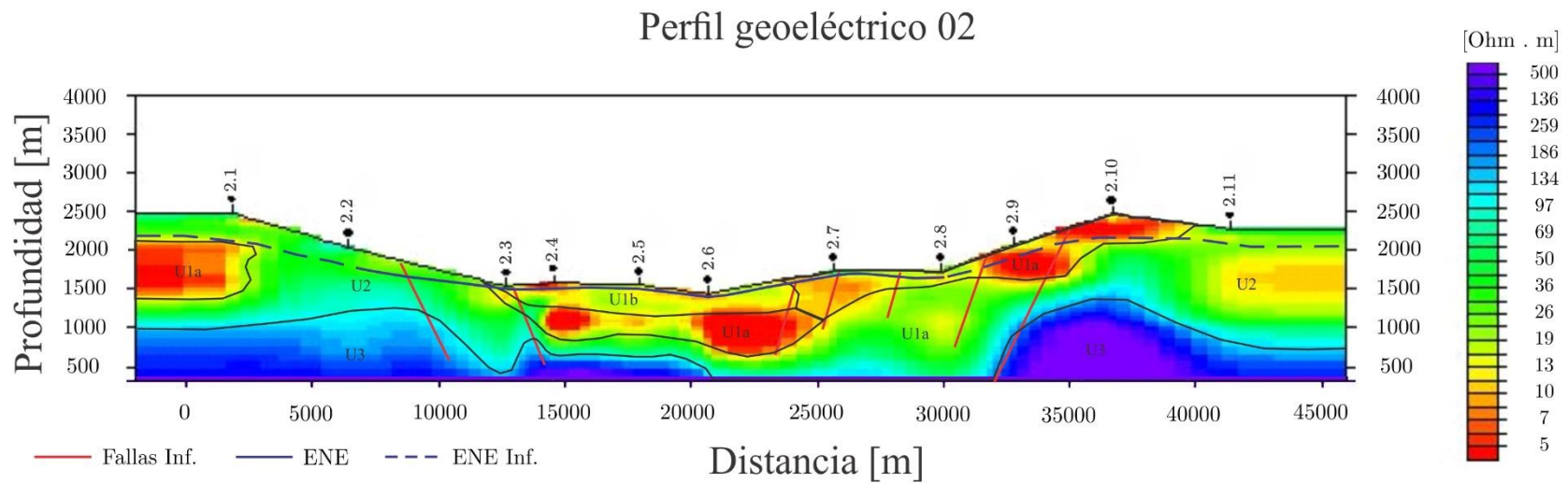








Fig. 4.29. Perfil geoelectrico 02

Unidad Geoelectrica	Intervalo Resistivos [Ohm*m]	Correlación
U1a	< 15	Conglomerado polimictico intraformacional y material aluvial.
U1b	15 a 30	Roca alterada y/o intercalación de areniscas con conglomerados polimicticos.
U2	30 a 100	Materiales granulares finos a medios, y rocas fracturadas. Se infiere saturación.
U3	> 100	Rocas cristalinas y/o materiales finos.

Tabla. 4.8. Descripción de unidades geoelectricas de perfil 02.

SIMBOLOGÍA

-  Sedimentos lacustres de limolita
-  Lavas basálticas
-  Secuencia de ignimbritas extensionales
-  Ignimbritas pre-extensionales
-  Areniscas del Eoceno con intercalación de limolita arenosa
-  Fallas Inf.

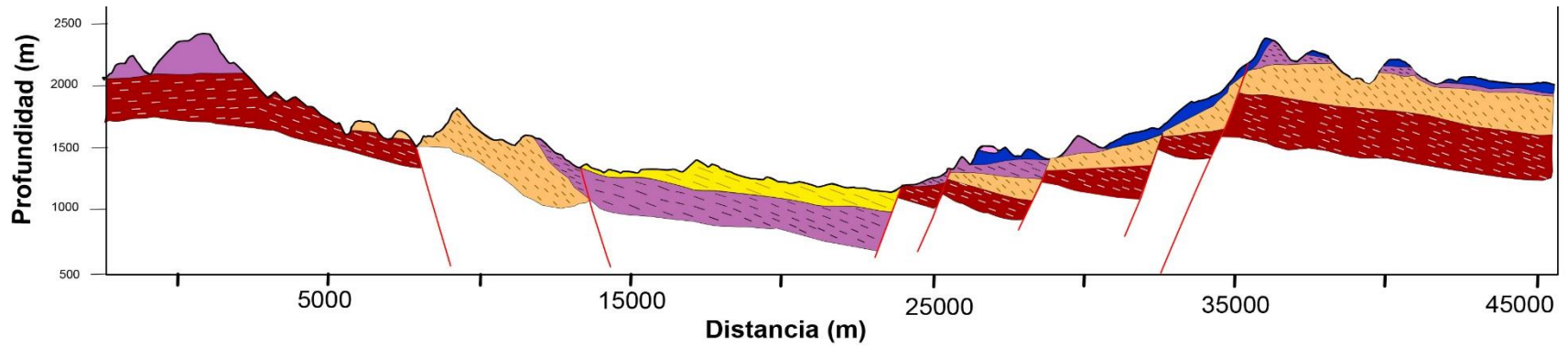


Fig. 4.30. Interpretación geológica de perfil geoelectrico 02.

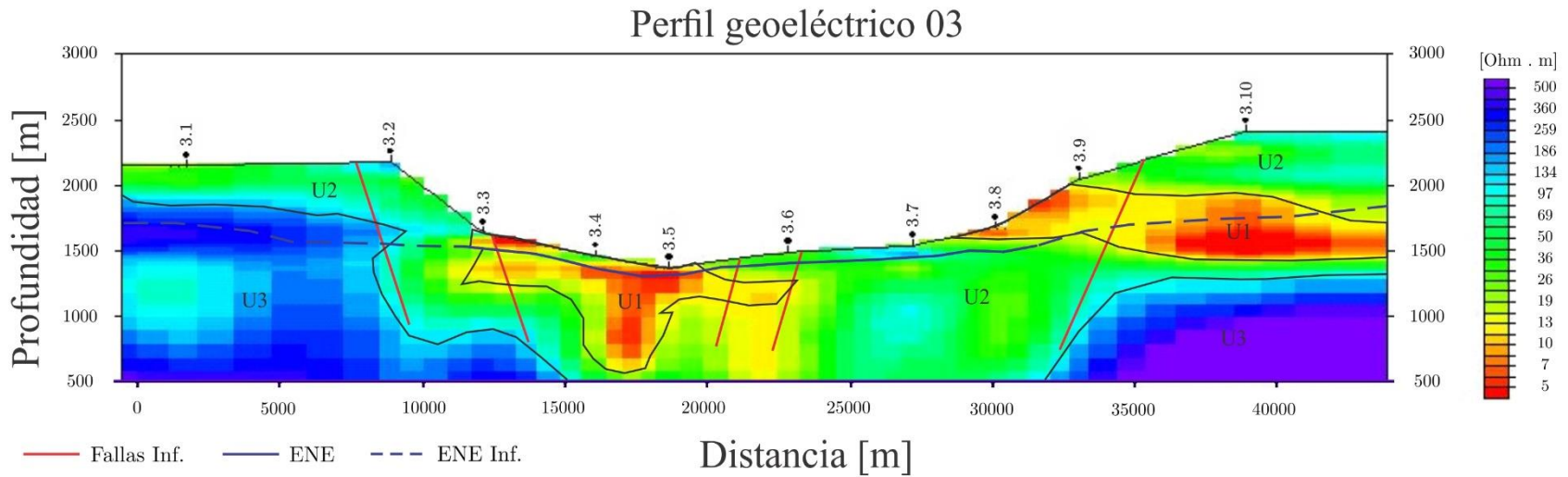









Fig. 4.31. Perfil geoelectrico 03

Unidad Geoelectrica	Intervalo Resistivos [Ohm*m]	Correlación
U1	5 a 30	Roca ígnea alterada y fracturada con intercalación de areniscas con conglomerados polimícticos y material aluvial. Se infiere saturación.
U2	30 a 100	Materiales granulares finos a medios, y rocas fracturadas.
U3	> 100	Rocas cristalinas y/o materiales finos.

Tabla. 4.9. Descripción de unidades geoelectricas de perfil 03.

SIMBOLOGÍA

-  Sedimentos lacustres de limolita
-  Lavas andesíticas basálticas
-  Lavas basálticas
-  Secuencia de ignimbritas extensionales
-  Ignimbritas pre-extensionales
-  Areniscas del Eoceno con intercalación de limolita arenosa
-  Fallas Inf.

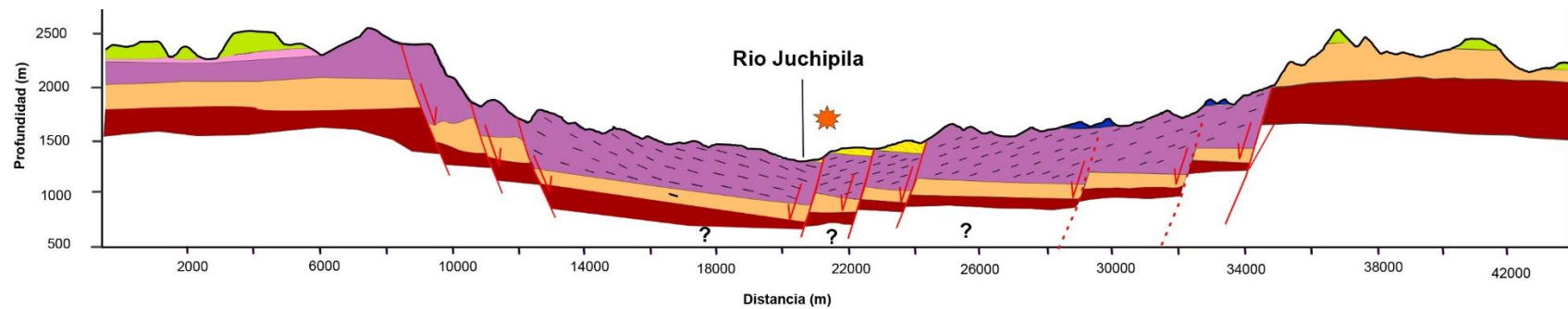


Fig. 4.32. Interpretación geológica de perfil geoelectrico 03.

Perfil geoelectrico 04

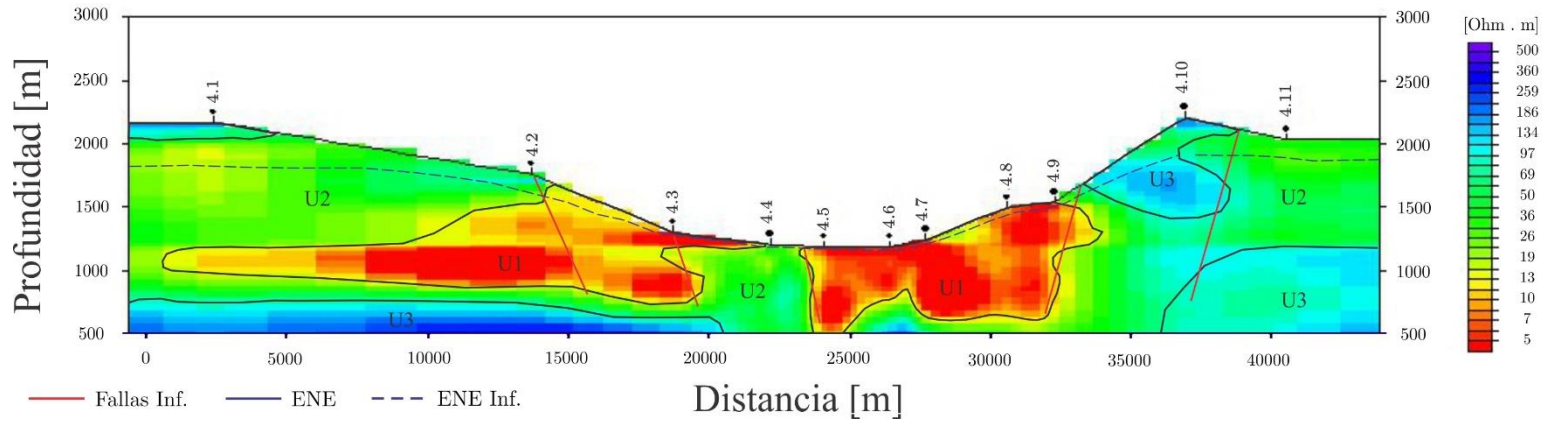


Fig. 4.33. Perfil geoelectrico 04

Unidad Geoelectrica	Intervalo Resistivos [Ohm*m]	Correlación
U1	< 15	Roca alterada y/o intercalación de areniscas con conglomerados polimicticos.
U2	30 a 100	Materiales granulares finos a medios, y rocas fracturadas.
U3	> 100	Rocas cristalinas y/o materiales finos.

Tabla. 4.10. Descripción de unidades geoelectricas de perfil 04.

SIMBOLOGÍA

- Sedimentos lacustres de limolita
- Lavas andesíticas basálticas
- Intercalación de areniscas y limolita
- Secuencia de ignimbritas extensionales
- Ignimbritas pre-extensionales
- Areniscas del Eoceno con intercalación de limolita arenosa
- Fallas Inf.

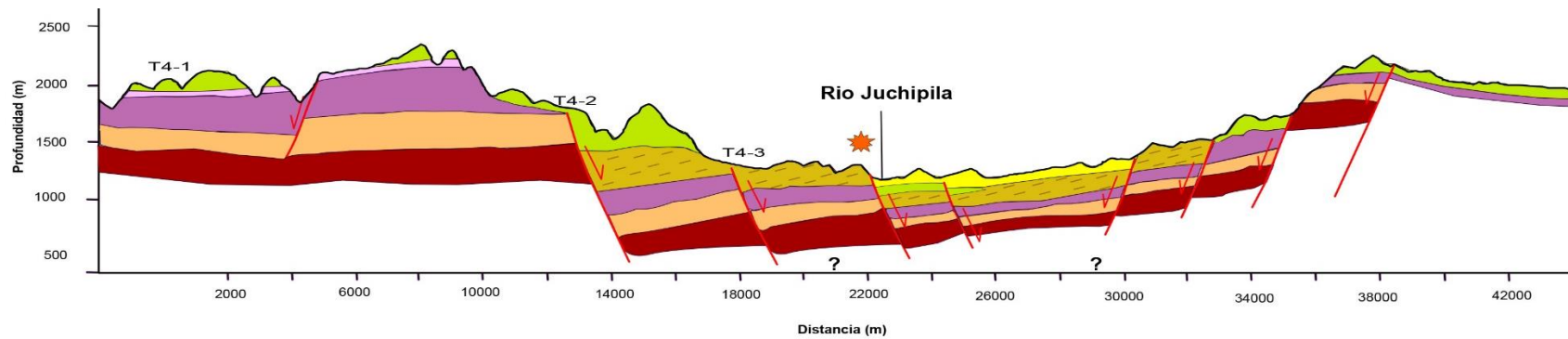


Fig. 4.34. Interpretación geológica de perfil geoelectrico 04.

4.4 Temperatura

Con las 3 salidas para trabajo en campo se realizó un censo de 54 aprovechamientos dentro de los límites del GJ, de estos 37 fueron pozos, 13 norias y 4 manantiales.

Dado que la temperatura media anual del acuífero es de 20.1 [°C], se consideraron como termales las temperaturas iguales o mayores a 30 [°C], todas las mediciones inferiores a este valor forman parte de la temperatura normal, es decir, del régimen natural del acuífero. En la sección de apéndices se presenta la Tabla 7.1 la cual expone los valores de temperatura registrados.

A todo lo largo del graben se detectaron aprovechamientos termales, siendo la zona sur donde mayores temperaturas se encontraron, con valores de 67 [°C] por parte del pozo P062 en el municipio de Moyahua de Estrada, 61 [°C] y 48 [°C] en los manantiales M024 y M022 respectivamente.

En el norte del GJ se detectaron temperaturas de hasta 58[°C] correspondiente al manantial M027 localizado al noroeste. Cabe mencionar que el termalismo se manifiesta tanto en pozos como en manantiales, aunque estos últimos poseen las temperaturas más altas, a excepción del manantial M007 el cual posee una temperatura normal de 26.2 [°C].

En la zona centro se puede apreciar una concentración de temperaturas termales en la parte más céntrica del GJ, con valores de hasta a 43 [°C], registradas en el manantial M019. En los puntos circundantes las temperaturas disminuyen, incluso hasta los 25 [°C], como ocurre en el manantial M029 ubicado en el lado oeste, con temperatura de 22.9 [°C].

En las zonas laterales las temperaturas del agua son muy variantes y continúan registrándose tanto en pozos, como en manantiales y norias. Tal es el caso de la noria N031 con 31 [°C].

Dentro de esta heterogeneidad de temperaturas, es posible apreciar una tendencia de aumento de temperatura hacia el sur del graben, esto coincide con los basaltos del mioceno tardío que afloran justo en esa región.

4.5 Resumen de modelo conceptual de flujo de agua subterránea

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas, acusan la presencia al interior del GJ de un acuífero de tipo libre, heterogéneo y anisótropo, este se encuentra constituido por un medio granular y otro fracturado. En general la porción superior (medio granular) está conformada por sedimentos aluviales, de granulometría que varía de gravas a arcillas y conglomerados polimícticos, se ha calculado que su espesor alcanza hasta 200 m en el centro del valle, que fueron depositados en una fosa de origen tectónico, ocasionado posiblemente por el fallamiento escalonado en forma de horts y grábenes, provocado por la tectónica extensional desarrollada durante el Oligoceno. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas de composición riolítica y en menor proporción basáltica, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Localmente, la presencia de calizas lacustres y horizontes arcillosos, le confieren al acuífero condiciones de semiconfinamiento.

La precipitación media anual ronda los 537.2 [mm] lo cual, considerando la elevada tasa de evapotranspiración, sería insuficiente para mantener el acuífero en buen estado ante el volumen anual que se extrae en la región. Ya que la topografía empinada, causa grandes volúmenes de recarga de agua meteórica en sistemas geotérmicos convectivos a través de altas tasas de infiltración (Moeck, 2014), se infiere que el AJJ recibe un vasto caudal a través de los

hombros del GJ. Esto contrasta con lo apreciado en graben de Upper Rhine en donde la baja permeabilidad impide la circulación de fluidos hacia el acuífero (Guillou-Frottier *et al.*, 2013), pues la alta tasa de fracturamiento en algunas regiones del GJ permite una buena infiltración hacia las litologías ignimbríticas al interior del graben.

La influencia del terreno escarpado en la carga hidráulica no solo es significativa en las configuraciones de campo volcánico como en el concepto de Hochstein, sino también en las configuraciones de cuencas sedimentarias adyacentes a los cinturones de montaña y en estructuras tectónicas extensionales (Moeck, 2014), como el caso del GJ.

Un ejemplo muy claro se aprecia en el modelo hidrogeológico para la cuenca de Alberta que incorpora los efectos del relieve topográfico en la infiltración de líquidos en la cuenca (Bachu, 1995) y que además, a diferencia del GJ, alberga sistemas dominados por la conducción de baja entalpía en diferentes carbonatos y areniscas estrechas (es decir, de baja permeabilidad) (Weides *et al.*, 2012). Por lo tanto, quedan evidenciados los efectos del terreno escarpado pueden ser importantes para la infiltración en sistemas de entalpía alta y baja.

Por otra parte, los valores de transmisividad del acuífero varían de 14 a 253 [m²/d]. Tomando en cuenta un espesor saturado promedio de 100 [m], la conductividad hidráulica presenta valores entre 0.14 y 2.3 [m/d]. Estos valores de transmisividad y conductividad hidráulica son bajos, y se atribuyen al tipo de litologías consolidadas y granulometría fina de las rocas que conforman el acuífero, como lo confirman los caudales específicos de algunos pozos, los cuales varían de 0.21 [l/s/m] y máximo de 2.4 [l/s/m]. Se registraron temperaturas variables de hasta 67 [°C] por lo que el acuífero se catalogaría como de baja entalpía según la clasificación de Hochstein (Hochstein, 1988).

Los sistemas geotérmicos dominados por convección y generalmente identificados como sistemas convencionales son controlados por actividad ígnea como una cámara de magma en áreas volcánicas, fallas en terrenos extensionales, o ambos, como cuerpos intrusivos en zonas de falla.

La Gran Cuenca en el oeste de los Estados Unidos, es un ejemplo de una región que alberga sistemas geotérmicos convencionales controlados predominantemente por fallas (Faulds *et al.*, 2010). La Gran Cuenca, como parte de la Cuenca del Norte y la Provincia de *Basin and Range*, ha experimentado un adelgazamiento por la extensión de gran magnitud y el emplazamiento de complejos de núcleos metamórficos en todo el Cenozoico (Sullivan and Snoke, 2007).

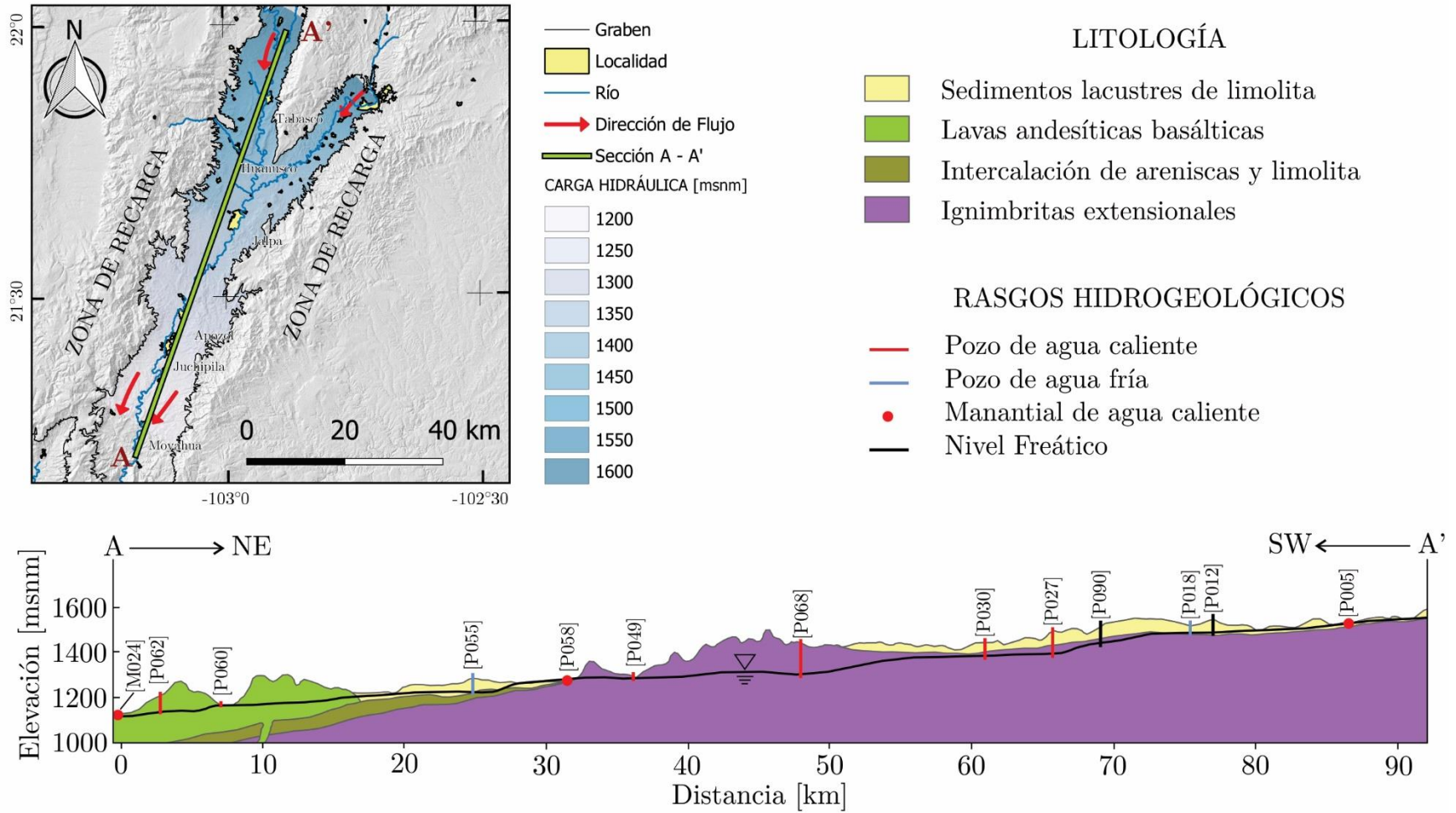
Otros ejemplos de los sistemas geotérmicos convencionales son los del oeste de Turquía (Faulds *et al.*, 2009) o los grábenes de grietas intracontinentales tectónicamente activos, como la grieta del este de África o el graben del Alto Rin en Europa Central (Moeck, 2014).

En contraste a estas características; se ha confirmado que el GJ se encuentra en una zona inactiva tanto desde el punto de vista del magmatismo como de la tectónica. Con estudios geológicos y geocronología de U-Pb y Ar-Ar se ha verificado que el volcanismo silíceo explosivo que dio origen a las ignimbritas que constituyen la estructura principal del graben es de edad Oligoceno (entre 33 y 29 [Ma] para el pulso mayor). El inicio de la extensión se estima en ~28 [Ma] pues hay evidencias de domos riolíticos que cortan fallas en esa temporalidad y también de basaltos de ~26 [Ma] que salen a través de las fallas del graben (Ferrari *et al.*, 2018). Cabe mencionar que los términos magmatismo activo, reciente e inactivo que se asumen, se apegan a las definiciones de McCoy-West *et al.* (McCoy-West *et al.*, 2011), entendiéndose como magmatismo activo al relacionado con el volcanismo de 500 años de antigüedad, magmatismo

reciente al relacionado con el volcanismo de 500–50,000 años de antigüedad, y magmatismo inactivo o extinto al volcanismo ocurrido hace más de 450,000 años de antigüedad. En el GJ la última evidencia de actividad volcánica pertenece a unos basaltos de entre 13 y 10 [Ma] los cuales se encuentran fallados (Ferrari *et al.*, 2018).

A diferencia de los sistemas geotérmicos dominados por convección, los sistemas en entornos tectónicos de placas pasivas donde no se producen anomalías astenosféricas, por ejemplo, los márgenes continentales pasivos, las áreas tectónicamente inactivas y de magmatismo inactivo, están predominantemente dominados por la conducción, estos sistemas geotérmicos a menudo se reconocen como no convencionales. En este tipo de sistemas geotérmicos, los acuíferos profundos se calientan por un flujo de calor casi normal, sin embargo también involucran rocas con producción de calor elevada, pues contienen elementos que generan calor radiogénico como el torio o el uranio las cuales, únicamente son capaces de generar sistemas geotérmicos de baja entalpia (Moeck, 2014).

Sección conceptual



5. Conclusiones

Dentro del Graben de Juchipila se desarrolla un sistema geotérmico de tipo basamento dominado por la conducción, este se aloja en la unidad fracturada que conformaron las ignimbritas emplazadas durante el Oligoceno y que contienen cantidades significativas de U, Th y K. La recarga de esta unidad hidrogeológica se desarrolla principalmente por medio de los sistemas de fracturas en los hombros del graben.

El flujo natural sobre el cauce del Río Juchipila de sedimentos finos y arcillas, generadas por la meteorización propia de las rocas del graben y adyacentes, se vio obstruido con el afloramiento de los basaltos del Mioceno tardío en la parte sur del graben. Esto ha generado la acumulación de dichos sedimentos, creando una capa de baja permeabilidad acuñada que propicia condiciones de semiconfinamiento en la unidad fracturada.

Por encima de las unidades fracturadas se encuentra una secuencia de rocas sedimentarias de origen lacustre y pluvial intercalada con sedimentos aluviales y volcánicos. En esta secuencia se almacena la unidad hidrogeológica con temperaturas inferiores a los 30 [°C]. La recarga de esta unidad se atribuye directamente a las precipitaciones en la zona del graben.

El confinamiento del acuífero emplazado la unidad fracturada forma un sistema geotérmico de baja entalpía debido al decaimiento radioactivo de los elementos inestables contenidos en las ignimbritas. El agua alcanza temperaturas aproximadas de 67 [°C] en las zonas de mayor confinamiento, mientras que en zonas parcialmente confinadas se produce una mezcla de aguas con la unidad granular que la sobreyace generando temperaturas que oscilan entre 26 y 49 [°C]. El reciente desarrollo de las tecnologías del Sistema Geotérmico Mejorado (EGS, por sus siglas en ingles), permite el desarrollo y aprovechamiento de sistemas geotérmicos como el del Graben de Juchipila.

Referencias citadas

- Aguirre-Díaz, G. J. *et al.* (2008) 'Chapter 4 The Ignimbrite Flare-Up and Graben Calderas of the Sierra Madre Occidental, Mexico', *Developments in Volcanology*, 10(C), pp. 143–180. doi: 10.1016/S1871-644X(07)00004-6.
- Anderson, E. *et al.* (2000) 'Understanding the Resistivities Observed in Geothermal Systems Grenada Geothermal View project Mariposa geothermal View project understanding the resistivities observed in geothermal systems', (May 2000). Available at: <https://www.researchgate.net/publication/265468337>.
- Anderson, T. H. and Silver, L. T. (1979) 'The role of the Mojave-Sonora megashear in the tectonic evolution of northern Sonora', *Geology of northern Sonora: Geological Society of America Field Trip Guidebook*, 7, pp. 59–68.
- Bachu, S. (1995) 'Synthesis and model of formation-water flow, Alberta Basin, Canada', *AAPG bulletin*. American Association of Petroleum Geologists, 79(8), pp. 1159–1178.
- Cameron, K. L. *et al.* (1989) 'Southern Cordilleran basaltic andesite suite, southern Chihuahua, Mexico: A link between Tertiary continental arc and flood basalt magmatism in North America', *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. Wiley Online Library, 94(B6), pp. 7817–7840.
- Carranza-Castañeda, O. *et al.* (2013) 'The early late Hemphillian (Hh2) faunal assemblage from Juchipila Basin', *State of Zacatecas, México and its biostratigraphic correlation with other Hemphillian fauna in Central México: Contributions in Science*, 521, pp. 13–49.
- Chirindja, F. J. *et al.* (2016) 'Combined electrical resistivity tomography and magnetic resonance sounding investigation of the surface-water/groundwater interaction in the Urema Graben, Mozambique', *Hydrogeology Journal*. doi: 10.1007/s10040-016-1422-y.
- CONAGUA, G. de A. S. (2018) 'Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Jalpa - Juchipila (3209), Estado de Zacatecas', p. 32.
- Cooper Jr, H. H. and Jacob, C. E. (1946) 'A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history', *Eos, Transactions American Geophysical Union*. Wiley Online Library, 27(4), pp. 526–534.

de Cserna, G. (1961) 'Parte I, Estratigrafía del Triasico Superior de la parte central del Estrada de Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología', *Paleontologia Mexicana*, 11.

Custodio, E. and Llamas, M. R. (2001) *Hidrología Subterránea*. Segunda Ed. Barcelona: Ediciones Omega.

Estep, J. W., Lucas, S. G. and González-León, C. M. (1997) 'Middle Triassic ammonites from Sonora, Mexico', *Rev Mex Cienc Geol*, 14, pp. 155–159.

Faulds, J. *et al.* (2010) 'Characterizing structural controls of geothermal reservoirs in the Great Basin, USA, and Western Turkey: developing successful exploration strategies in extended terranes', in *World Geothermal Congress 2010*, p. 11–p.

Faulds, J. E. *et al.* (2009) 'Structural controls on geothermal systems in western Turkey: a preliminary report', *Geothermal Resources Council Transactions*, 33, pp. 375–381.

Ferrari, L., Martínez-Resendiz, V., Loza-Aguirre, I., Beltrán-Martínez, B. (2018) 'Trabajo en proceso de publicación'.

Ferrari, L., Valencia-Moreno, M. and Bryan, S. (2007) 'Magmatism and tectonics of the Sierra Madre Occidental and its relation with the evolution of the western margin of North America', *Special Paper 422: Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México*, 2422(01), pp. 1–39. doi: 10.1130/2007.2422(01).

Glenn M, D. (2007) 'AQTESOLV Pro'. HydroSOLVE Inc.

Guillou-Frottier, L. *et al.* (2013) 'Structure of hydrothermal convection in the Upper Rhine Graben as inferred from corrected temperature data and basin-scale numerical models', *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2013.02.008.

Hantush, M. S. (1960) 'Modification of the theory of leaky aquifers', *Journal of Geophysical Research*. Wiley Online Library, 65(11), pp. 3713–3725.

Hasterok, D. and Webb, J. (2017) 'On the radiogenic heat production of igneous rocks', *Geoscience Frontiers*. Elsevier Ltd, 8(5), pp. 919–940. doi: 10.1016/j.gsf.2017.03.006.

Hochstein, M. P. (1988) 'Assessment and modelling of geothermal reservoirs (small utilization schemes)', *Geothermics*. Elsevier, 17(1), pp. 15–49.

- Kruseman, G. P. and De Ridder, N. A. (1990) 'Analysis and evaluation of pumping test data, ILRI publication 47', *International Institute for Land Reclamation and Improvement, The Netherlands*.
- Lahiere, L. (1982) 'Petrology of lacustrine deposits, Juchipila Quadrangle, Zacatecas: New Orleans', *Louisiana, University of New Orleans, Master's thesis*.
- McCoy-West, A. J. *et al.* (2011) 'Geothermal resources in the Pacific Islands: The potential of power generation to benefit indigenous communities', in *Proceedings of the Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.
- McKee, J. W., Jones, N. W. and Anderson, T. H. (1988) 'Las Delicias basin: A record of late Paleozoic arc volcanism in northeastern Mexico', *Geology*. Geological Society of America, 16(1), pp. 37–40.
- Moeck, I. S. (2014) 'Catalog of geothermal play types based on geologic controls', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 37, pp. 867–882. doi: 10.1016/j.rser.2014.05.032.
- Moench, A. F. (1997) 'Flow to a well of finite diameter in a homogeneous, anisotropic water table aquifer', *Water Resources Research*. Wiley Online Library, 33(6), pp. 1397–1407.
- Morales-Arredondo, I. *et al.* (2016) 'A low-Temperature geothermal system in central Mexico: Hydrogeochemistry and potential heat source', *Geochemical Journal*, 50(3), pp. 211–225. doi: 10.2343/geochemj.2.0406.
- Neuman, S. P. and Witherspoon, P. A. (1969) 'Theory of flow in a confined two aquifer system', *Water Resources Research*. Wiley Online Library, 5(4), pp. 803–816.
- Nieto-Samaniego, Á. F. *et al.* (1999) 'Variation of Cenozoic extension and volcanism across the southern Sierra Madre Occidental volcanic province, Mexico', *Bulletin of the Geological Society of America*, 111(2–3), pp. 347–363.
- Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Alvarez, S. A. and Labarthe-Hernández, G. (1997) 'La deformación Cenozoica porlaramídica en la parte meridional de la Mesa Central, México.'
- Petrides, B. and Cartwright, I. (2006) 'The hydrogeology and hydrogeochemistry of the Barwon Downs Graben aquifer, southwestern Victoria, Australia', *Hydrogeology Journal*. doi: 10.1007/s10040-005-0018-8.

Pidwinry, M. (2011) 'Köppen Climate Classification System', *Encyclopedia of Earth*. doi: 10.5194/hess-11-1633-2007.

Sullivan, W. A. and Snoke, A. W. (2007) 'Comparative anatomy of core-complex development in the northeastern Great Basin, USA', *Rocky Mountain Geology*. University of Wyoming, 42(1), pp. 1–29.

'Surfer 11' (2013). Colorado: Golden Software Inc. Available at: <https://www.goldensoftware.com/>.

Tartakovsky, G. D. and Neuman, S. P. (2007) 'Three-dimensional saturated-unsaturated flow with axial symmetry to a partially penetrating well in a compressible unconfined aquifer', *Water Resources Research*. Wiley Online Library, 43(1).

Team, Q. D. (2002) 'QGis'. OSGeo. Available at: <https://qgis.org/es/site/>.

Theis, C. V (1935) 'The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage', *Eos, Transactions American Geophysical Union*. Wiley Online Library, 16(2), pp. 519–524.

Van Tuyen, D. *et al.* (2015) 'Structural features of geothermal field from magnetotelluric survey in Northern Central Region of Vietnam', in *Proceedings of World Geothermal Congress*.

Del Valle-Toledo, E. (1985) *Apuntes de Introducción a los métodos Geofísicos de Exploración*. México: División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Departamento de Geofísica, UNAM.

Walton, W. C. (1990) *Groundwater pumping tests*. CRC Press.

Webber, K. L., Fernandez, L. A. and Simmons, W. B. (1994) 'Geochemistry and mineralogy of the Eocene-Oligocene volcanic sequence, southern Sierra Madre Occidental, Juchipila, Zacatecas, Mexico', *Geofísica Internacional*, pp. 77–89.

Weides, S. *et al.* (2012) 'Geothermal exploration of Paleozoic formations in Central Alberta', *Canadian Journal of Earth Sciences*. NRC Research Press, 50(5), pp. 519–534.

APÉNDICES

CVE_INT	CVE_ORG	CVE_BETSCO	LOCALIDAD	NOM_ACUI	CVE_ACUI	CVE_MUN
M022	Rancho las Maravillas	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
M024	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
M025	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
N012	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
N013	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
N014	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
N015	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
N016	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
N017	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
N018	NoData	NoData	La Media Luna	NoData	-9999	-9999
N019	NoData	NoData	Jalpa	NoData	-9999	-9999
N020	NoData	NoData	La Media Luna	NoData	-9999	-9999
N021	NoData	NoData	La Media Luna	NoData	-9999	-9999
N022	La Media Luna	NoData	La Media Luna	NoData	-9999	-9999
N023	NoData	NoData	La Media Luna	NoData	-9999	-9999
N024	NoData	NoData	La Media Luna	NoData	-9999	-9999
P005	Tenanguillo	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
P012	NoData	B-237	NoData	NoData	-9999	-9999
P018	NoData	B-234	NoData	NoData	-9999	-9999
P027	JJ-21	B-123	Campo Los Cacones	Jalpa-Juchipila	3209	32023
P028	JJ-22	NoData	Mesa del Roble	Jalpa-Juchipila	3209	32023
P030	JJ-18	B-53	Rancho Los Pinos	Jalpa-Juchipila	3209	32023
P032	NoData	B-035	NoData	NoData	-9999	-9999
P034	JJ-17	B-19	Teocaltichillo	Jalpa-Juchipila	3209	32023
P035	JJ-16	B-50	Chalchisco de Abajo	Jalpa-Juchipila	3209	32023
P038	JJ-15	NoData	NoData	Jalpa-Juchipila	3209	32023
P041	Mesa de Carretones	B-132	Mesa de Carretones	NoData	-9999	-9999
P043	NoData	B-155	Pozo de Fausto	NoData	-9999	-9999
P044	NoData	B-163	NoData	NoData	-9999	-9999
P049	JJ-10	NoData	San Miguel	Jalpa-Juchipila	3209	32023
P050	JJ-07	NoData	Apozol	Jalpa-Juchipila	3209	32023
P052	NoData	B-265	NoData	NoData	-9999	-9999
P055	JJ-06	B-318	La Gasoinera	Jalpa-Juchipila	3209	32023
P056	JJ-01	B-320	Contitlan	Jalpa-Juchipila	3209	32023
P058	NoData	NoData	Barranca del Río, Moyahua	Jalpa-Juchipila	-9999	-9999
P059	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
P060	NoData	NoData	Granja Santa Cecilia	NoData	-9999	-9999
P061	NoData	NoData	Rancho Los Arcos	NoData	-9999	-9999
P062	NoData	NoData	Mezquite Redondo	NoData	-9999	-9999
P064	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
P065	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
P066	NoData	NoData	Campo Deportivo	NoData	-9999	-9999
P067	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
P068	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
P069	NoData	NoData	Los contreras	NoData	-9999	-9999
P079	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
P081	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
P084	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
P085	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
P087	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
P088	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
P089	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
P090	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999
P091	NoData	NoData	NoData	NoData	-9999	-9999

Tabla 7.1. Base de datos general del proyecto (1/8)

CVE_INT	APR_TIPO	X	Y	Z_ASTER	Z_CAMPO	ADEME	PTP	ALT_BROC	DIAM_DES	USO
M022	Manantial	688907	2345525	1145	1129	-9999	-9999	-9999	-9999	Domestico
M024	Manantial	688801	2346496	1139	1135	-9999	-9999	-9999	-9999	Agricola
M025	Manantial	689219	2346139	1129	1136	-9999	-9999	-9999	-9999	Agricola
N012	Noria	691262	2352615	1181	1168	-9999	30	0.65	2	Domestico
N013	Noria	697744	2375133	1268	1231	-9999	-9999	-9999	4	Publico Urbano
N014	Noria	693132	2361380	1211	1212	-9999	-9999	-9999	3	Agricola
N015	Pozo	693130	2361381	1211	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Agricola
N016	Noria	693061	2362168	1214	1212	-9999	-9999	0.58	3	Agricola
N017	Noria	693229	2362066	1219	1213	-9999	-9999	0.62	3	Agricola
N018	Noria	697697	2380270	1300	-9999	-9999	-9999	-9999	4	NoData
N019	Noria	708910	2392719	1368	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
N020	Noria	697625	2380239	1300	-9999	-9999	-9999	0.7	-9999	NoData
N021	Noria	697607	2380152	1294	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
N022	Noria	697621	2380085	1290	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
N023	Noria	697702	2380102	1290	-9999	-9999	-9999	0	-9999	NoData
N024	Noria	697755	2380197	1298	-9999	-9999	-9999	0.54	-9999	NoData
P005	Manantial	716350	2425203	1536	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P012	Pozo	713688	2417998	1531	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P018	Pozo	713077	2415978	1525	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P027	Pozo	710212	2406064	1515	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P028	Pozo	712532	2403677	1471	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P030	Pozo	710527	2402644	1447	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P032	Pozo	709815	2401020	1447	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P034	Pozo	711896	2399601	1421	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P035	Pozo	706541	2397842	1471	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P038	Pozo	707117	2396272	1475	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P041	Pozo	705234	2391919	1406	-9999	-9999	-9999	-9999	6	NoData
P043	Pozo	705467	2390079	1387	-9999	-9999	-9999	0.2	-9999	NoData
P044	Pozo	703611	2386712	1378	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P049	Pozo	698302	2378149	1316	-9999	8	170	-9999	3	Publico Urbano
P050	Pozo	697761	2375642	1280	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P052	Pozo	698549	2375058	1380	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P055	Pozo	696031	2370114	1265	1269	-9999	-9999	0.5	3	Publico Urbano
P056	Pozo	693271	2362052	1217	1215	-9999	-9999	-9999	3	Publico Urbano
P058	Pozo	686232	2340354	1093	1091	-9999	-9999	0.26	3	Publico Urbano
P059	Pozo	692169	2350901	1222	1207	-9999	-9999	-9999	6	Agricola
P060	Pozo	691296	2352741	1186	1169	-9999	130	0	1.5	Agricola
P061	Pozo	692950	2361133	1215	1216	-9999	90	-9999	6	Agricola
P062	Pozo	690145	2348688	1254	-9999	14	169	-9999	6	NoData
P064	Pozo	699455	2385270	1440	-9999	8	-9999	0.44	2	NoData
P065	Pozo	701241	2387848	1444	-9999	-9999	-9999	0.45	4	NoData
P066	Pozo	706990	2392094	1421	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P067	Pozo	702644	2392781	1486	-9999	-9999	-9999	-9999	4	NoData
P068	Pozo	702610	2392275	1484	-9999	8	-9999	63	3	NoData
P069	Pozo	705230	2391177	1410	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P079	Pozo	709527	2402753	1478	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P081	Pozo	738239	2418878	1645	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P084	Pozo	725764	2413453	1643	1643	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P085	Pozo	726320	2416322	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P087	Pozo	713309	2416324	1496	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P088	Pozo	713318	2416294	1501	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P089	Pozo	711932	2414646	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P090	Pozo	710034	2411405	1576	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P091	Pozo	710127	2401407	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData

Tabla 7.1. Base de datos general del proyecto (2/8)

CVE_INT	PNE_02	PNE_03	PNE_04	PNE_JUL_04	ENE_JUL_04	PNE_05	PNE_DIC_05	PNE_06	PNE_07
M022	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
M024	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
M025	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N012	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N013	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N014	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N015	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N016	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N017	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N018	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9998	-9999	-9999	-9999
N019	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9997	-9999	-9999	-9999
N020	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9996	-9999	-9999	-9999
N021	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9995	-9999	-9999	-9999
N022	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9994	-9999	-9999	-9999
N023	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9993	-9999	-9999	-9999
N024	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9992	-9999	-9999	-9999
P005	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P012	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	32.14	-9999	-9999
P018	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	35.59	-9999	-9999
P027	-9999	-9999	-9999	97.14	1407.86	-9999	99.89	-9999	-9999
P028	-9999	-9999	-9999	13.86	1456.14	-9999	-9999	-9999	-9999
P030	-9999	-9999	-9999	70.44	1369.56	-9999	64.86	-9999	-9999
P032	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	38.42	-9999	-9999
P034	-9999	-9999	-9999	34.85	1385.15	-9999	34.63	-9999	-9999
P035	-9999	-9999	-9999	45.57	1433.43	-9999	38.9	-9999	-9999
P038	-9999	-9999	-9999	106.12	1343.88	16.85	108.26	-9999	-9999
P041	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	53.73	-9999	-9999
P043	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	39.06	-9999	-9999
P044	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	31.47	-9999	-9999
P049	-9999	-9999	14.95	14.95	1270.05	14.64	-9999	-9999	14.82
P050	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	33.88	-9999	34.97	34.1
P052	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	100.81	-9999	-9999
P055	-9999	-9999	-9999	96.78	1183.22	-9999	99.63	-9999	-9999
P056	-9999	-9999	-9999	5.49	1209.51	-9999	4.98	-9999	-9999
P058	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P059	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P060	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P061	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P062	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P064	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P065	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P066	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P067	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P068	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P069	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P079	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P081	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P084	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P085	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P087	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P088	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P089	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P090	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P091	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999

Tabla 7.1. Base de datos general del proyecto (4/8)

CVE_INT	PNE_JUL_07	PNE_08	PNE_09	PNE_ABR_09	PNE_10	PNE_11	PNE_OCT_11	PNE_12	PNE_13	PNE_OCT_13
M022	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
M024	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
M025	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N012	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N013	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N014	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N015	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N016	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N017	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N018	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N019	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N020	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N021	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N022	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N023	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N024	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P005	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P012	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P018	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P027	105.4	-9999	46.8	108.6	-9999	48.12	108.85	-9999	-9999	115.3
P028	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P030	59.32	-9999	-9999	70.7	-9999	85.2	-9999	-9999	88	-9999
P032	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P034	34.26	10.3	-9999	-9999	9.86	-9999	33.28	-9999	-9999	35.3
P035	34	-9999	-9999	-9999	122.96	-9999	35.6	-9999	129	-9999
P038	112.55	-9999	-9999	112.3	-9999	-9999	116.1	-9999	-9999	127.11
P041	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P043	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P044	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P049	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	14.45	-9999	-9999	14.76	-9999
P050	-9999	33.71	34.57	-9999	35.23	36.51	-9999	-9999	-9999	-9999
P052	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P055	105.34	35.13	-9999	102.6	-9999	-9999	108.18	-9999	-9999	111.64
P056	5.55	-9999	-9999	5.54	-9999	5.1	5.65	4.65	-9999	5.5
P058	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P059	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P060	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P061	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P062	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P064	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P065	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P066	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P067	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P068	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P069	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P079	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P081	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P084	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P085	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P087	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P088	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P089	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P090	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P091	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999

Tabla 7.1. Base de datos general del proyecto (5/8)

CVE_INT	PNE_14	PNE_JUL_15	PNE_NOV_16	ENE_NOV_16	ENE_JUN_17	PNE_JUN_17	PND_JUN_17
M022	-9999	-9999	-9999	-9999	1129	0	-9999
M024	-9999	-9999	-9999	-9999	1135	0	-9999
M025	-9999	-9999	-9999	-9999	1136	0	-9999
N012	-9999	-9999	-9999	-9999	1149	19.5	-9999
N013	-9999	-9999	-9999	-9999	1231	0	-9999
N014	-9999	-9999	-9999	-9999	1207	4.98	-9999
N015	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N016	-9999	-9999	-9999	-9999	1207	5.24	-9999
N017	-9999	-9999	-9999	-9999	1207	5.98	-9999
N018	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N019	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N020	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N021	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N022	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N023	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N024	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P005	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P012	-9999	-9999	73	1451	-9999	-9999	-9999
P018	-9999	-9999	38	1472	-9999	-9999	-9999
P027	-9999	112.1	112	1393	-9999	-9999	-9999
P028	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P030	-9999	63.73	65	1375	-9999	-9999	-9999
P032	-9999	-9999	64	1380	-9999	-9999	-9999
P034	-9999	33.15	36	1384	-9999	-9999	-9999
P035	-9999	-9999	39	1507	-9999	-9999	-9999
P038	-9999	120.3	125	1325	-9999	-9999	-9999
P041	-9999	-9999	64	1342	-9999	-9999	-9999
P043	-9999	-9999	48	1352	-9999	-9999	-9999
P044	-9999	-9999	42	1343	-9999	-9999	-9999
P049	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	15.22	17.22
P050	-9999	-9999	-9999	1275	-9999	-9999	-9999
P052	-9999	-9999	102	1273	-9999	-9999	-9999
P055	-9999	103.1	107	1173	-9999	-9999	100
P056	-9999	5.25	6	1209	1208	6.9	-9999
P058	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P059	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P060	-9999	-9999	-9999	-9999	1107	62.1	-9999
P061	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	10.08
P062	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P064	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P065	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P066	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P067	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P068	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P069	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P079	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P081	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P084	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P085	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P087	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P088	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P089	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P090	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P091	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999

Tabla 7.1. Base de datos general del proyecto (6/8)

CVE_INT	PNE_DIC_17	ENE_DIC_17	PND_DIC_17	PNE_JUN_18	PND_JUN_18	ENE_JUN_18	TEMP_JUN_18	PNE_CONF
M022	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	0
M024	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	0
M025	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	0
N012	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	19.5
N013	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	0
N014	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	4.98
N015	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
N016	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	5.24
N017	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	5.98
N018	8.09	1291.91	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	8.09
N019	7.9	1360.1	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	7.9
N020	9.84	1290.16	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	9.84
N021	5.37	1288.63	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	5.37
N022	4.12	1285.88	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	4.12
N023	4.18	1285.82	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	4.18
N024	5.12	1292.88	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	5.12
P005	-9999	-9999	-9999	-0.4	-9999	1536.4	30	-0.4
P012	-9999	-9999	-9999	79.62	-9999	1451.38	-9999	79.62
P018	-9999	-9999	-9999	37.3	-9999	1487.7	26	37.3
P027	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	30	112
P028	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P030	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	30	65
P032	-9999	-9999	-9999	76.33	-9999	1370.67	-9999	76.33
P034	-9999	-9999	-9999	52.7	-9999	1368.3	28	-9999
P035	-9999	-9999	-9999	53.43	-9999	1417.57	-9999	53.43
P038	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	125
P041	73.64	1332.36	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	73.64
P043	51.42	1335.58	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	51.42
P044	-9999	-9999	-9999	42.9	-9999	1335.1	29	42.9
P049	16.36	1299.64	16.45	-9999	-9999	-9999	-9999	16.36
P050	-9999	-9999	-9999	-1.05	-9999	1281.05	33	-1.05
P052	-9999	-9999	-9999	101.72	-9999	1278.28	-9999	101.72
P055	-9999	-9999	-9999	-9999	150.05	-9999	28.1	107
P056	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	6.9
P058	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P059	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P060	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	62.1
P061	6.95	1208.05	8.35	-9999	-9999	-9999	-9999	6.95
P062	79.8	1174.2	126	-9999	-9999	-9999	-9999	79.8
P064	134.14	1305.86	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	134.14
P065	140.38	1303.62	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	140.38
P066	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P067	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
P068	163.41	-9999	183	-9999	-9999	-9999	-9999	163.41
P069	84	1326	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	84
P079	-9999	-9999	-9999	71	-9999	1407	28	71
P081	-9999	-9999	-9999	38.9	-9999	1606.1	24	38.9
P084	-9999	-9999	-9999	200	-9999	1443	-9999	200
P085	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	34	-9999
P087	-9999	-9999	-9999	5	-9999	1491	-9999	5
P088	-9999	-9999	-9999	25.25	-9999	1475.75	-9999	25.25
P089	-9999	-9999	-9999	-9999	134	-9999	29	-9999
P090	-9999	-9999	-9999	85.8	-9999	1490.2	-9999	85.8
P091	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	28	-9999

Tabla 7.1. Base de datos general del proyecto (7/8)

CVE_INT	ENE_CONF	GASTO	TEMP_C1	TEMP_C2	TEM_JUN_17	TEM_DIC_17	TEMP_CONF	FUENTE
M022	1129	-9999	64	-9999	46.3	-9999	46.3	Campo GH JUN17
M024	1135	-9999	-9999	-9999	61	-9999	61	Campo GH JUN17
M025	1136	-9999	-9999	-9999	39	-9999	39	Campo GH JUN17
N012	1149	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH JUN17
N013	1231	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH JUN17
N014	1207	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH JUN17
N015	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH JUN17
N016	1207	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH JUN17
N017	1207	-9999	-9999	-9999	26.2	-9999	26.2	Campo GH JUN17
N018	1291.91	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH DIC17
N019	1360.1	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH DIC17
N020	1290.16	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH DIC17
N021	1288.63	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH DIC17
N022	1285.88	-9999	-9999	-9999	-9999	34	34	Campo GH DIC17
N023	1285.82	-9999	-9999	-9999	-9999	38	38	Campo GH DIC17
N024	1292.88	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH DIC17
P005	1536.4	-9999	30	-9999	-9999	-9999	30	Campo GH JUN18
P012	1451.38	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH JUN18
P018	1487.7	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	26	Campo GH JUN18
P027	1393	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	30	Campo GH JUN18
P028	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH JUN18
P030	1375	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	30	Campo GH JUN18
P032	1370.67	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH JUN18
P034	1368.3	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	28	Campo GH JUN18
P035	1417.57	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH JUN18
P038	1325	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH JUN18
P041	1332.36	-9999	-9999	-9999	-9999	26	26	Campo GH DIC17
P043	1335.58	-9999	-9999	-9999	-9999	26	26	Campo GH DIC17
P044	1335.1	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	29	Campo GH JUN18
P049	1299.64	-9999	-9999	-9999	45	48	48	Campo GH DIC17
P050	1281.05	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	33	Campo GH JUN18
P052	1278.28	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH JUN18
P055	1173	-9999	-9999	-9999	32	-9999	28.1	Campo GH JUN18
P056	1208	-9999	-9999	-9999	32	-9999	32	Campo GH JUN17
P058	-9999	-9999	-9999	-9999	32	-9999	32	Campo GH JUN17
P059	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH JUN17
P060	1107	-9999	-9999	-9999	32	-9999	32	Campo GH JUN17
P061	1208.05	-9999	-9999	-9999	32	-9999	32	Campo GH DIC17
P062	1174.2	-9999	-9999	-9999	-9999	67	67	Campo GH DIC17
P064	1305.86	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH DIC17
P065	1303.62	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH DIC17
P066	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH DIC17
P067	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH DIC17
P068	1320.59	-9999	-9999	-9999	-9999	38	38	Campo GH DIC17
P069	1326	-9999	-9999	-9999	-9999	26	26	Campo GH DIC17
P079	1407	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	28	Campo GH JUN18
P081	1606.1	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	24	Campo GH JUN18
P084	1443	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH JUN18
P085	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	34	Campo GH JUN18
P087	1491	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH JUN18
P088	1475.75	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH JUN18
P089	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	29	Campo GH JUN18
P090	1490.2	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Campo GH JUN18
P091	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	28	Campo GH JUN18

Tabla 7.1. Base de datos general del proyecto (8/8)