



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Caracterización hidrogeológica del  
Semigraben de Santiago  
Papasquiario, Durango.**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Geólogo**

**P R E S E N T A**

Kenya Torres Paniagua

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. José Antonio Hernández Espriú



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**

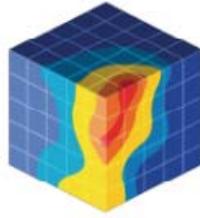


**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



The  
HYDRO  
geology  
Group  
FACULTY OF ENGINEERING  
UNAM



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

Este documento representa la Tesis No.28 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.28 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**

El mapa geológico, la columna estratigráfica y los fechamientos presentados en este trabajo, se elaboraron como parte de la tesis de maestría del Lic. Juan Carlos Castico Reynoso dirigida por el Dr. Luca Ferrari.

De igual forma un agradecimiento al Lic. Sergio Macías Medrano por facilitar los datos del modelo digital de elevación del área del semigraben de Santiago Papasquiaro, así como de otras herramientas necesarias para el desarrollo de esta tesis.

## **Agradecimientos personales**

Al que es sobre todo nombre, mi Dios, que me ha guiado, fortalecido y bendecido cada día de mi existencia.

A mis padres que me han sostenido en todo este camino, gracias por su amor, paciencia, apoyo y cafés preparados durante las noches de desvelo.

A mi hermano por escucharme, por darme ánimo y cariño. A mis difuntas mascotas, Katy y Koda que hicieron los días más felices y las noches más llevaderas con su amorosa compañía.

A Donovan por escucharme todos los días, por sus palabras de aliento, por compartir felicidad, tristeza y por su amor incondicional.

A mi director de tesis, el Dr. José Antonio Hernández Espriú, Ing. Alberto Arias Paz (D.E.P.), Ing. Javier Mancera Alejándrez y al Lic. Sergio Macías Medrano, cuya sabiduría, experiencia y apoyo me ha ayudado a crecer profesional y personalmente. También al Lic. Sergio Salinas que con su tiempo, dedicación y paciencia me ayudó a realizar de la mejor manera los mapas y figuras.

A mis sinodales, el Dr. Luca Ferrari, Ing. Gabriel Salinas Calleros, Ing. Javier Mancera Alejándrez y el Ing. Martín Carlos Vidal García, por sus valiosos comentarios y correcciones, las cuales ayudaron a la mejora de este trabajo.

A la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Autónoma de México, por la formación brindada en estos 5 años del nivel superior, por las oportunidades y apoyo brindado en cada uno de los semestres cursados.

*Kenya Torres Paniagua*

## Resumen

Se realizó una caracterización hidrogeológica del semigraben de Santiago Papasquiaro, Durango, el cual abarca de manera parcial el área definida por el acuífero denominado Tepehuanes - Santiago, de acuerdo a los límites establecidos por CONAGUA. Este a lo largo de su historia diversas anomalías térmicas, las cuales no pueden ser justificadas por vulcanismo, ya que la última actividad magmática tuvo lugar millones de años atrás. Por ello, la actividad hidrotermal de la región indica la existencia de sistemas geotérmicos no convencionales, esencialmente por el decaimiento radioactivo de elementos inestables presentes en la litología ignimbrítica. El estudio del acuífero ha permitido verificar la existencia de al menos 2 unidades hidroestratigráficas, una granular donde el agua meteórica se almacena de manera directa y otra fracturada con un carácter semipermeable, en la que la recarga tiene lugar a los laterales del semigraben; en algunas zonas su condición es de semiconfinamiento, puntos donde se desarrolla el sistema geotérmico, cuyas aguas se llegan a mezclar con las de menor temperatura del granular. En este trabajo se presentan las diferentes herramientas y evidencias que respaldan tal hipótesis, como la configuración piezométrica, parámetros hidráulicos y fisicoquímicos del agua subterránea; en el primero se obtuvieron diferentes direcciones de flujo, hacia el norte del semigraben está caracterizado con una temperatura máxima de 65°C y tiende a dirigirse hacia una depresión, mientras que las corrientes de menor temperatura, es decir de 20° se dirigen desde el sur hacia el centro del área de estudio; en el segundo ámbito se obtuvieron datos de transmisividad a través de pruebas de bombeo interpretadas por el método de Cooper & Jacob (1946), con resultados de 48.99 y 4.59 [m<sup>2</sup>/día] y de coeficiente de almacenamiento mayor a 1 ( $S > 1$ ) en la etapa de abatimiento, mientras que los datos de recuperación corresponden a 41.54 y 8.92 [m<sup>2</sup>/día], y  $S > 1$  respectivamente; en los parámetros fisicoquímicos se observó que la conductividad eléctrica, al igual que los sólidos disueltos totales aumentan hacia el centro del semigraben, entretanto los valores del potencial de oxidación- reducción lo hacen hacia el sur y el pH no destaca con alguna tendencia hacia regiones específicas del área de estudio.

## **Abstract**

*A hydrogeological characterization of the semigraben of Santiago Papasquiaro, Durango was carried out, which partially covers the area defined by the aquifer called Tepehuanes - Santiago, according to the limits established by CONAGUA. Throughout its history there have been several thermal anomalies, which cannot be justified by volcanism, since the last magmatic activity took place millions of years ago. Therefore, the hydrothermal activity of the region indicates the existence of unconventional geothermal systems, essentially due to the radioactive decay of unstable elements in the ignimbritic lithology. The study of the aquifer has verified the existence of at least 2 hydrostratigraphic units, one granular where meteoric water is stored in a direct way and another fractured unit with a semi-permeable character, where recharge takes place at the sides of the semigraben; in some areas it is semi-confined, points where the geothermal system develops, whose waters get to mix with those of lower temperature of the granular one. This work presents different tools and evidences in order to support this hypothesis, such as the piezometric configuration, hydraulic and physicochemical parameters of the groundwater; in the first one, different flow directions were obtained, in the north of the semigraben it is characterized with a maximum temperature of 65°C and it tends to head toward a depression, while the currents of lower temperature, about 20°C are aimed from the south towards the center of the study area; in the second tool, transmissivity data were obtained through pumping tests interpreted by the method of Cooper & Jacob (1946) method, with results of 48.99 and 4.59 [m<sup>2</sup>/day] and storage coefficient greater than 1 ( $S > 1$ ) in the abatement stage, while the recovery data corresponds to 41.54 and 8.92 [m<sup>2</sup>/day], and  $S > 1$  respectively; on the physicochemical parameters it was noted that the electrical conductivity, as well as the total dissolved solids increase towards the center of the semigraben, while the values of the oxidation-reduction potential increase to the south and the pH does not stand out with any tendency for specific regions of the study area.*

# Índice de contenido

<b>Índice de figuras.....</b>	<b>9</b>
<b>Índice de tablas.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>12</b>
<b>2. Zona de estudio.....</b>	<b>14</b>
2.1 Localización.....	14
2.2 Marco geológico.....	15
2.2.1 Rasgos tectónicos y estructurales.....	15
2.2.2 Estratigrafía Regional.....	17
2.2.3 Estratigrafía Local.....	20
2.3 Marco Hidrológico.....	24
2.3.1 Hidrología superficial.....	24
Climatología.....	25
Principales usos del agua.....	27
2.3.2 Hidrología subterránea.....	27
Acuífero.....	27
Principales usos del agua.....	28
<b>3. Métodos y materiales.....</b>	<b>30</b>
3.1 Revisión de información existente.....	30
3.2 Configuración piezométrica del acuífero.....	32
3.3 Estimación de parámetros hidráulicos.....	33
3.4 Obtención de parámetros fisicoquímicos del agua.....	36
<b>4. Resultados y discusión.....</b>	<b>37</b>
4.1 Configuración piezométrica.....	37
4.2 Parámetros hidráulicos.....	43
4.2.1 Interpretación de pruebas de bombeo.....	43
4.3 Parámetros fisicoquímicos del agua.....	55
4.3.1 Temperatura.....	55
4.3.2 Conductividad eléctrica.....	57
4.3.3 Sólidos disueltos totales.....	59
4.3.4 Potencial de hidrógeno.....	61
4.3.5 Potencial de oxidación- reducción.....	63

<b>5. Conclusiones.....</b>	<b>65</b>
<b>Referencias citadas.....</b>	<b>66</b>
<b>Apéndices.....</b>	<b>69</b>

## Índice de figuras

- Fig. 2.1** Localización geográfica del área de estudio.
- Fig. 2.2** Mapa de elevación entre Durango (DGO) y Santa María del Oro (SMDO). Se presentan las principales fallas que controlan las depresiones de la región.
- Fig. 2.3** Columna estratigráfica del semigraben de Santiago Papasquiario
- Fig. 2.4** Mapa geológico-estructural del Semigraben de Santiago Papasquiario
- Fig. 2.5** Localización del Acuífero Tepehuanes- Santiago
- Fig. 2.6** Temperatura media, estación climatológica 10084: Tepehuanes
- Fig. 2.7** Temperatura media, estación climatológica 10077: Santiago Papasquiario
- Fig. 2.8** Tipos de aprovechamientos del agua superficial, acuífero Tepehuanes- Santiago en 2018
- Fig. 2.9** Tipos de aprovechamientos del agua en el acuífero Tepehuanes- Santiago en 2018
- Fig. 2.10** Estatus de aprovechamientos en el acuífero Tepehuanes- Santiago en 2018.
- Fig. 2.11** Uso de aprovechamientos en el acuífero Tepehuanes- Santiago en 2018.
- Fig. 2.12** Uso del volumen de extracción el acuífero Tepehuanes- Santiago en 2018.
- Fig. 3.1** Trabajo de campo con el Ing. Arias Paz, Mancera Alejandrez y el Lic. Macías Medrano, medición de profundidad al nivel estático, Julio 2019.
- Fig. 3.2** Localización de los pozos de bombeo.
- Fig. 3.3** Modelos teóricos de relación tiempo vs. abatimiento en sistemas- acuíferos granulares sin consolidar.
- Fig. 3.4** Sondeos de campo utilizando un termómetro de mercurio, el medidor multiparamétrico HANNA HI 9828 y una toma de muestra, Julio 2019.
- Fig. 4.1** Carga Hidráulica de acuerdo a CONAGUA en el 2010, editada por el autor en el 2020
- Fig.4.2** Gráfico de relación MDE\_ ASTER y CARGA de acuerdo a los datos medidos en campo, 2019
- Fig. 4.3** Carga Hidráulica configurada por el Autor, Julio 2019.
- Fig. 4.4** Perfiles y flujo de agua subterránea a lo largo del semigraben de Santiago Papasquiario, 2020.
- Fig. 4.5** Carga Hidráulica definitiva elaborada por el Autor, Julio 2019.
- Fig. 4.6** Prueba de bombeo del pozo Tepehuanes pozo 1 (SANX, 2010) y sus relaciones tiempo- abatimiento.
- Fig. 4.7** Prueba de bombeo del pozo El Tambor (SANX, 2010) y sus relaciones tiempo- abatimiento.
- Fig. 4.8** Prueba de bombeo del pozo San José de Favelas (SANX, 2010) y sus relaciones tiempo- abatimiento.
- Fig. 4.9** Herramienta esquemática de identificación del régimen de flujo que representa la derivada logarítmica del abatimiento en función del tiempo logarítmico
- Fig. 4.10** Gráficos de relación tiempo- abatimiento (azul) con sus correspondientes derivadas (rojo) y resultados de acuerdo a los modelos de Cooper & Jacob (1946) y Renard (2009),

utilizando Aquidplot (Hernández-Espriú et al., 2018) para la prueba de bombeo Tepehuanes pozo 1.

- Fig. 4.11** Gráficos de relación tiempo-abatimiento (azul) con sus correspondientes derivadas (rojo) y resultados de acuerdo a los modelos de Cooper & Jacob (1946) y Renard (2009), utilizando Aquidplot (Hernández-Espriú et al., 2018) para la prueba de bombeo El Tambor.
- Fig. 4.12** Gráficos de relación tiempo-abatimiento (azul) con sus correspondientes derivadas (rojo) y resultados de acuerdo a los modelos de Cooper & Jacob (1946) y Renard (2009), utilizando Aquidplot (Hernández-Espriú et al., 2018) para la prueba de bombeo San José de Favelas.
- Fig. 4.13** Resultados e interpretación obtenidos por el autor con AQTESOLV (Glenn, 1989), de la prueba de bombeo Tepehuanes pozo 1, en su etapa de abatimiento.
- Fig. 4.14** Resultados e interpretación obtenidos por el autor con AQTESOLV (Glenn, 1989), de la prueba de bombeo El Tambor, en su etapa de abatimiento.
- Fig. 4.15** Resultados e interpretación obtenidos por el autor con AQTESOLV (Glenn, 1989), de la prueba de bombeo San José de Favelas, en su etapa de abatimiento.
- Fig. 4.16** Resultados e interpretación obtenidos por el autor con AQTESOLV (Glenn, 1989), de la prueba de bombeo Tepehuanes pozo 1.
- Fig. 4.17** Resultados e interpretación obtenidos por el autor con AQTESOLV (Glenn, 1989), de la prueba de bombeo El Tambor.
- Fig. 4.18** Resultados e interpretación obtenidos por el autor con AQTESOLV (Glenn, 1989), de la prueba de bombeo San José de Favelas.
- Fig. 4.19** Mapa de distribución de la temperatura del agua subterránea en el semigraben de Santiago Papasquiario en el año 2019, así como los diferentes aprovechamientos en los que se realizaron las mediciones.
- Fig. 4.20** Mapa de distribución del comportamiento de la conductividad eléctrica del agua subterránea en el semigraben de Santiago Papasquiario en el año 2019, así como los diferentes aprovechamientos en los que se realizaron las mediciones.
- Fig. 4.21.** Gráfico de relación Temperatura y Conductividad Eléctrica de acuerdo a los datos medidos en campo, 2019.
- Fig. 4.22** Mapa de distribución de sólidos disueltos totales del agua subterránea en el semigraben de Santiago Papasquiario en el año 2019, así como los diferentes aprovechamientos en los que se realizaron las mediciones.
- Fig. 4.23** Mapa de distribución del potencial de hidrógeno del agua subterránea en el semigraben de Santiago Papasquiario en el año 2019, así como los diferentes aprovechamientos en los que se realizaron las mediciones.
- Fig. 4.24** Mapa de distribución del potencial de oxidación- reducción del agua subterránea en el semigraben de Santiago Papasquiario en el año 2019, así como los diferentes aprovechamientos en los que se realizaron las mediciones.

## Índice de tablas

**Tabla 3.1** Descripción de campos considerandos en la base de datos del proyecto.

**Tabla 4.1** Resultados de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas por la empresa SANX Ingeniería Integral y desarrollo por el método de Theis durante la etapa de abatimiento y Theis & Jacob para la recuperación, publicado por CONAGUA en el 2010

**Tabla 4.2** Resultados e interpretaciones obtenidas por el autor con AquiDplot (Hernández-Espriú et al., 2018), de las pruebas de bombeo realizadas por SANX Ingeniería Integral y desarrollo S.A. de C.V. en el año 2010.

**Tabla 4.3** Resultados e interpretaciones obtenidas por el autor con AQTESOLV (Glenn, 1989), de las pruebas de bombeo realizadas por SANX Ingeniería Integral y desarrollo S.A. de C.V. en el año 2010.

**Tabla. 4.4** Rangos y resultados obtenidos por la autora de las pruebas de bombeo realizadas por SANX Ingeniería Integral y desarrollo S.A. de C.V. en el año 2010.

**Tabla 7.1** Base de datos general del proyecto.

**Tabla 7.1** Base de datos fisicoquímicas del proyecto.

## 1- Introducción

Mientras más pasan los años, la importancia del agua subterránea va en aumento y con ello la necesidad de su estudio; esto debido a que de acuerdo con los datos de Estadística del Agua (CONAGUA, 2018) el 39.1% del volumen total del agua utilizada procede del agua subterránea, del cual 70.71 % es destinada para la agricultura, 21.45% para el abastecimiento público, el 6.48% se emplea en la industria y un 1.36% para la energía eléctrica, excluyendo hidroelectricidad; siendo estos elementos imprescindibles para cada aspecto de la vida. Conocer las características y el comportamiento de un acuífero, así como de su agua da paso a tener una gestión hídrica adecuada y con ello, satisfacer las necesidades humanas, agrícolas, ganaderas y ambientales.

En cuanto a la generación de potencia, la geotermia ha adquirido gran trascendencia para abastecer de energía y calor a la población humana, en consecuencia a su bajo costo y producción de CO<sub>2</sub>, tema latente durante los últimos años. En México, con un total de 4 campos en operación (Cerro Prieto, Los Azúfres, Los Humeros y Las Tres Vírgenes) se generan 6,045 [GWh] de manera anual, esto de acuerdo con la información publicada por Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica en el 2019.

La tectónica activa juega un papel significativo en este tipo de energía, ya que la mayoría de las plantas geotérmicas se ubican en los bordes de placa; donde la corteza es débil y fracturada, hay alta sismicidad y gran actividad volcánica; y por lo tanto construye un alto flujo geotérmico (Fernández Díez, 2000). Este calor se produce ya sea a través de un sistema convectivo por medio de transferencia directa o un sistema conductivo, proveniente de cuerpos magmáticos.

Para entender un sistema convectivo, el cual se considera como de alta entalpía, es necesario estudiar la tectónica a diferentes escalas. Mientras que para un sistema conductivo o de baja entalpía, la importancia radica en la geodinámica y con ello en las fracturas y fallas, además de diversos procesos que participan en la formación de calor. Algunos casos del anterior sistema se consideran como no convencionales, ya que el calor no es producto de un intrusivo, si no de otro proceso.

Para adentrarse más en el concepto de no convencional es necesario comprender cómo es que normalmente ocurre la interacción agua meteórica-acuífero. Un acuífero se recarga por medio de agua meteórica o también conocida como agua de lluvia y esta llega a las profundidades por medio de fallas, fracturas y porosidad de las formaciones geológicas. Este fluido tiene gran capacidad de absorber, transportar y transferir calor; esto último por medio del proceso de convección a través del movimiento del mismo, por ello al principio, durante la lluvia, el agua tiene bajas temperaturas pero al entrar en contacto con un entorno más caliente, las moléculas del agua se separan y se dispersan, con ello se vuelve menos denso, obtiene su calor y lo transporta (Incropera, DeWitt, Bergman y Lavine, 2007). Aunado a esto, si el ambiente por el que pasa el líquido para llegar al acuífero tiene decaimiento radioactivo; es decir, en su composición hay isótopos que pasan a ser otros y liberan energía en forma de calor durante este proceso, esta energía es adquirida y transportada por el agua que tiene contacto con el medio.

Los isótopos radioactivos más comunes en generar calor son el Uranio (U-238, U-235), Torio (Th-232) y Potasio (K-40) (Lubimova, 1968); presentes en la parte somera de la corteza terrestre. Normalmente los isótopos de Uranio y Potasio están en la composición de las rocas volcánicas ácidas, las cuales son un punto de partida para el presente estudio.

Los grabenes han sido estudiados debido a su génesis y con ello la interacción de la tectónica. En este caso, en el semigraben de Santiago Papasquiaro, definido por una falla normal principal, ubicado al NE de la ciudad de Durango, se encuentran elementos resultantes de vulcanismo alcalino y del transporte de componentes hacia dentro de la cuenca, que en este caso son conformados por gravas y arenas. Es importante señalar que el flanco principal de este semigraben está constituido por el relieve de la Sierra Madre Occidental (SMO). La geología de la SMO está dominada por conjuntos de rocas ígneas asociados a diferentes episodios magmáticos, que resultaron de la subducción de la placa Farallón debajo de la placa de Norteamérica (Ferrari, Valencia- Moreno y Bryan, 2005). De las cuales la zona de importancia radica en las ignimbritas, emplazadas principalmente durante el Oligoceno y Mioceno.

Al ser las ignimbritas de composición alcalina en una zona con diversas secciones de fallas normales y fracturas, el tema del decaimiento radioactivo se hace latente en el semigraben. Por medio del análisis hidrogeológico del Acuífero Tepehuanes - Santiago es posible analizar las variaciones geotérmicas y su relación con un sistema geotérmico no convencional; ya que a pesar de haber sido una zona con alta actividad volcánica, no se registran cuerpos intrusivos que sean responsables del termalismo de la zona.

Por lo anterior esta investigación tiene como objetivo el conocer las características del acuífero, del sistema geotérmico y como es que estos dos interactúan entre si, a partir del comportamiento del flujo subterráneo, sus temperaturas y composición fisicoquímica del mismo.

## 2. Zona de estudio

### 2.1 Localización

El área de estudio (Fig. 2.1) se encuentra dentro del semigraben de Tepehuanes-Santiago Papasquiario, el cual se ubica al noreste de la capital de Durango. Este con rumbo NW-SE tiene una longitud de casi 140 km, se acerca a los 21.5 km en su ancho más amplio y 1 km en la parte más angosta del mismo, cuenta con una superficie aproximada de 1,750 km<sup>2</sup>. Forma parte de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental (SMO) y se encuentra representada por los mapas geológicos-estructurales principalmente publicados por el Servicio Geológico Mexicano (Cartas, G13C48, G13C49, G13C59).

La vía de acceso para llegar a esta zona es la carretera federal N° 23, la cual comunica la ciudad de Durango con Guanaceví y atraviesa transversalmente al área de estudio.

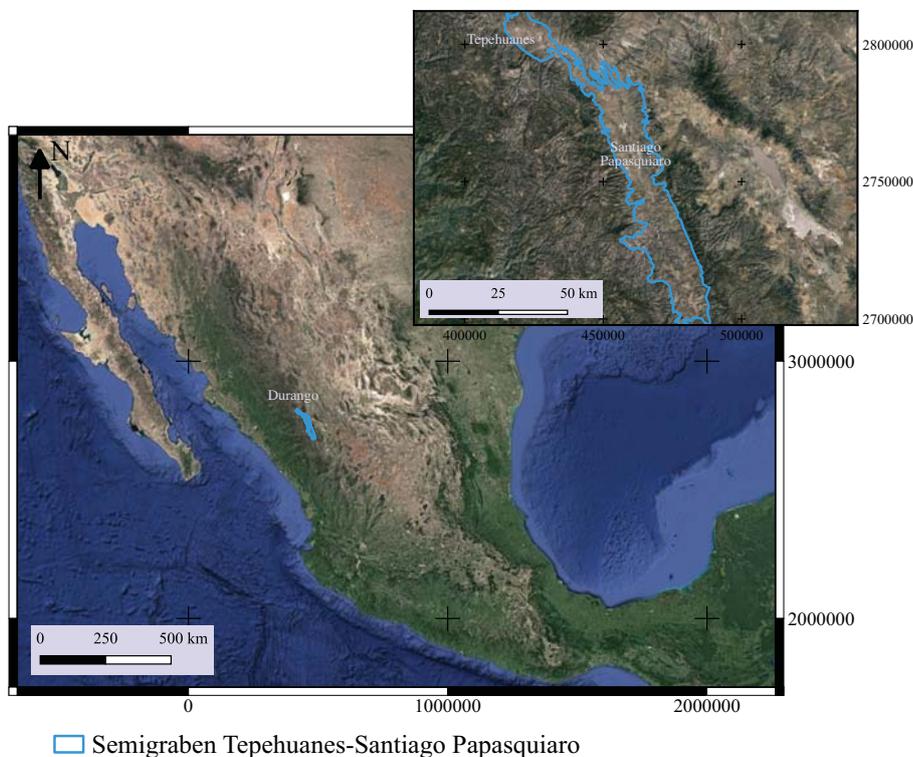


Fig. 2.1 Localización geográfica del área de estudio.

## 2.2 Marco Geológico

### 2.2.1 Rasgos tectónicos y estructurales

La Sierra Madre Occidental (SMO) es una provincia volcánica que se extiende de manera continua por aproximadamente 1,000 km a lo largo de la parte NW del territorio mexicano, esta puede seguirse desde los Estados Unidos de América en Texas hasta su límite sur, la intersección con la Faja Volcánica Transmexicana; incluye los estados de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Nayarit, Zacatecas, Jalisco, Aguascalientes, Guanajuato, San Luis Potosí y Querétaro. La Sierra esta formada por rocas volcánicas de edad Cretácico-Cenozoico, de las cuales el paquete de ignimbritas riolíticas es el más importante debido a su gran volumen, cuyo estimado es de 400,000 km<sup>3</sup> asumiendo un espesor promedio de 1km. (Aguirre Díaz et al., 2008)

La apertura del Golfo de California ha inducido la formación de grandes cañadas en el flanco oeste mientras que la tectónica extensional ha provocado la formación de amplias depresiones tectónicas en el flanco este de la provincia. La SMO es el resultado de diferentes episodios volcano- tectónicos que coinciden con la formación de la provincia de Basin and Range (Cuencas y Sierras) (Aguirre- Díaz et al., 2008) que abarca la porción noroeste de México y continúa por el oeste de Estados Unidos. Su desarrollo está conectado con las etapas finales de subducción de la placa de Farallón con la placa Norteamericana que desde el Eoceno presentó episodios de extensión cortical, dando paso a la formación de fosas tectónicas.

La disminución del ángulo de subducción y la Convergencia entre las dos placas previamente mencionadas corresponden a los eventos volcánicos del Eoceno; a pesar de que la placa Norteamericana ya había entrado en contacto directo con la del Pacífico durante el Oligoceno-Mioceno, la placa Farallón continuó su proceso de subducción. Debido a un posible desprendimiento de la parte más profunda de esta placa, se originó un flujo de material astenosférico, que junto con los esfuerzos de los límites de placas, generó varios pulsos ignimbríticos. Diferentes estudios geoquímicos y petrológicos indican que las rocas de la SMO forman un conjunto típicamente calci- alcalino, caracterizado por concentraciones de potasio intermedias a altas y enriquecimiento relativamente bajo en Fe (Ferrari, Valencia-Moreno y Bryan, 2005).

La extensión que comenzó en el Eoceno Tardío- Oligoceno basculó gradualmente a la secuencia volcánica del Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano y formó al semigraben de Santiago Papasquiario (SP) con rumbo NNW, este se sitúa en la parte noroeste de la Mesa Centra y se estima que su tiro ronda los 200 m, pero al ser consideradas a también las fallas adyacentes mayores el tiro total es de alrededor de 600 m. La actividad de las fallas con rumbo NW del Sistema de fallas San Luis-Tepehuanes (Fig. 2.2) fue sincrónica con el desarrollo del semigraben, este sistema consiste en fallas normales que estuvieron activas desde el Eoceno hasta tiempos Cuaternarios. De acuerdo con [Loza-Aguirre et al. \(2012\)](#) en esta zona se identificaron 3 fases de deformación: la primera ocurrida durante el Eoceno- Oligoceno temprano que formó fallas con rumbo NW, pertenecientes al sistema de fallas San Luis- Tepehuanes y fallas NNW que forman parte del semigraben SP, posteriormente la deformación migró hacia el sur hasta la región de Río Chico- Otinapa; la segunda fase de deformación tuvo lugar durante el Mioceno Temprano- Medio con dirección NNW y se reactivaron fallas con rumbo NW; y por último, la tercera deformación tuvo lugar durante el Plioceno- Cuaternario, con desplazamientos menores hacia el NE que cortaron a los depósitos no consolidados.

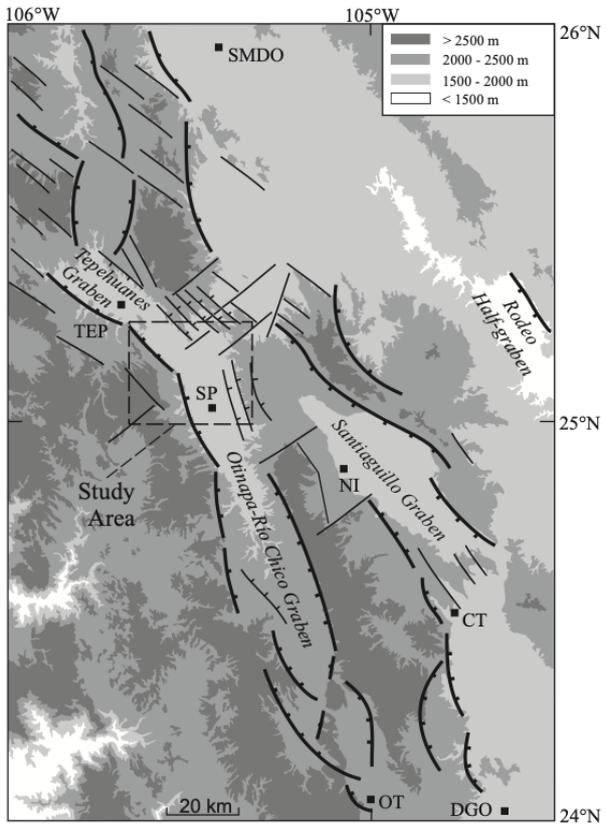


Fig. 2.2 Mapa de elevación entre Durango (DGO) y Santa María del Oro (SMDO). Se presentan las principales fallas que controlan las depresiones de la región, las cuales son el graben de Tepihuanes, el semi graben Rodeo, el graben de Santiaguillo y el graben de Río Chico-Otinapa, también se señala la zona del semi graben de Santiago Papasquiario (SP) que abarca desde el principio del rectángulo punteado hasta antes del graben Río Chico-Otinapan. ([Loza-Aguirre et al., 2012](#))

Localmente, el semigraben está conformado por una variedad de fallas normales, principalmente a las cercanías de los hombros de este, fallas que son más notorias hacia el norte del área de estudio y en la zona noreste del poblado de Santiago Papasquiario. De igual manera, se presentan fallas laterales izquierdas en los hombros del semigraben, en las ignimbritas pertenecientes a la SMO, con fallamiento normal predominante y visible unos kilómetros al noroeste del asentamiento antes mencionado. Esta información se encuentra representada en la Fig. 2.4.

### 2.2.2 Estratigrafía Regional

#### *Basamento pre-Volcánico.*

Debajo de la Sierra Madre Occidental existen rocas más antiguas, es decir su basamento, que forman parte del cratón de Norteamérica; una sección de ese basamento se presume fue desplazado aproximadamente 800 km al sureste durante el Jurásico Medio- Tardío, esto debido a un fallamiento lateral izquierdo denominado la megacizalla Mojave-Sonora; esta parte del basamento está formado por plutones graníticos, gneises y esquistos cuyas edades se estiman entre 1,800 y 1,700 Ma; mientras que el basamento no transportado está caracterizado por rocas clásticas y volcánicas metamorfizadas con edades entre 1,700 y 1,600 Ma (Anderson y Silver, 1979).

Extensas secuencias de rocas marinas cubren las rocas cristalinas proterozoicas, estas corresponden a dos ambientes principales, uno de plataforma marina de aguas someras y otro de cuenca marina profunda. Sobre estas rocas cristalinas también se encuentran rocas paleozoicas con metamorfismo de bajo grado, secuencias volcánicas y volcanoclásticas, asociadas a los remanentes de la acreción de Gondwana y Laurentia en el principio del periodo Pérmico (McKee, Jones & Anderson, 1988).

Las rocas mesozoicas que abundan al oeste de la SMO, conocidas como el Grupo Barranca (Alencaster & de Cserna, 1961) consisten en una secuencia de sedimentos clásticos continentales y marinos que se formaron en el Triásico Tardío-Jurásico Temprano. Existen rocas sedimentarias marinas de edad similar que también han sido reportadas, conocidas como el Grupo Antimonio (González- León, 1997), este está sobreyacido discordantemente por rocas sedimentarias clásticas intercaladas con flujos volcánicos, interpretadas como productos de un arco continental que tuvo lugar en el Jurásico.

Durante el Jurásico Tardío y Cretácico Temprano se depositaron de manera discordante sedimentos fluvio-deltáicos y marinos, que están asociados al relleno de cuencas de subsidencia y pertenecen al Grupo Bisbee. Después de esto se desarrollaron cuencas sintectónicas asociadas a la Orogenia Laramide, las cuales se encuentran al noreste de Sonora y donde se acumularon sedimentos fluviales y lacustres, nombrados como Grupo Cabullona (Ferrari, Valencia-Moreno y Bryan, 2005). Mientras que en la parte de Sinaloa se emplazaron batolitos del Cretácico, posteriores a la formación de ortogneises, rocas metasedimentarias y metavolcánicas.

### *Complejo Volcánico Inferior*

Durante el Cretácico Tardío y a principios del Cenozoico se desarrolló la Orogenia Laramide que dominó la actividad volcánica del norte de México, dicho movimiento dio lugar al arco Laramide, nombrado así por ser contemporáneo a la deformación. El Complejo Volcánico Inferior (CVI) fue producto de dicho arco y está constituido por batolitos graníticos compuestos de gran magnitud, cuya composición va desde diorita a granito alcalino y por una secuencia volcánica andesítica que incluye tobas y flujos riolíticos y dacíticos (Ferrari, Valencia-Moreno y Bryan, 2005) que se encuentran subyacidos por la Formación Tarahumara, la cual se caracteriza por areniscas y lutitas. Los sectores centro y sur de la SMO están constituidos por batolitos de composición granodiorítica, lavas andesíticas y riolíticas, además de ignimbritas silíceas. Las rocas en la parte central se encuentran alteradas por hidrotermalismo y en la parte sur los cuerpos plutónicos intrusionan a rocas sedimentarias marinas del Cretácico.

### *Arco magmático del Eoceno*

Al norte se encuentran expuestas principalmente en Chihuahua, están representadas por secuencias de ignimbritas silíceas, lavas andesíticas y dacíticas (Ferrari, Valencia-Moreno y Bryan, 2005). En la parte central de la SMO estas rocas del Eoceno tienen mayor espesor en el límite Sinaloa-Durango, y consisten en coladas riolíticas y andesíticas con intrusiones dioríticas; mientras que la zona sur se caracteriza por la presencia de ignimbritas silíceas, domos riolíticos y lavas andesíticas cubiertas por arenisca y conglomerado con clastos de andesita.

### *Grupo Volcánico Superior*

Este grupo se encuentra emplazado de manera discordante sobre el Complejo Volcánico Inferior y las rocas del Eoceno; está compuesto por ignimbritas riolíticas, tobas de caída y lavas de composición silícica a intermedia, así como flujos máficos, estos últimos en menor proporción. En la sección norte de la SMO la secuencia está constituida por ignimbritas riolíticas intercaladas con lavas dacíticas y riolíticas, además de basaltos con un rango de edad del Oligoceno al Plioceno; en la zona centro existen secuencias ignimbríticas, domos riolíticos y lavas basálticas y riolíticas que se emplazaron en el Oligoceno, así como plutones granodioríticos y coladas basáltico-andesíticas del Mioceno Temprano; mientras que en el sector sur existen dos pulsos

ignimbríticos separados, ocurrido durante el Oligoceno temprano y el otro en el Mioceno temprano, los productos de este comportamiento consisten en tobas de flujo de cenizas silíceas, domos riolíticos y estructuras de caldera (Ferrari, Valencia-Moreno y Bryan, 2005). Algunos autores relacionan la producción de estas ignimbritas con la provincia de Basin and Range, esto de acuerdo a observaciones geológicas y a la superposición de estos dos sucesos en espacio y tiempo.

### *Volcanismo post ignimbrítico*

En esta etapa el magmatismo se vuelve más heterogéneo y disperso, de manera general el volcanismo es bimodal y discontinuo, tiende a migrar hacia el futuro Golfo de California. Se distinguen dos grupos de los cuales el primero se encuentra conformado por rocas máficas de composición basáltico-andesítica del Oligoceno que fueron emplazadas discontinuamente después de cada episodio ignimbrítico, distribuidas en la zona norte y centro de la SMO, estas secuencias pertenecen a la provincia Basáltico- Andesítica del Sur propuesta por Cameron et al., (1989). El segundo grupo está compuesto por rocas alcalinas del Mioceno que se depositaron principalmente en la parte noroccidental de la SMO, zona caracterizada por ignimbritas, derrames riolíticos y riolíticos peralcalinos. En el resto de la Sierra el volcanismo alcalino se encuentra en forma de basaltos emplazados en fisuras, así como en campos monogenéticos.

### *Relleno Sedimentario*

Cubriendo discordantemente a lavas se encuentra una secuencia perteneciente al Eoceno superior de arenisca con intercalaciones de limolita y conglomerado con contenido de clastos de andesita. Durante el Eoceno Tardío la Sierra Madre Occidental, tuvo diferentes episodios de extensión cortical que dieron como resultado cuencas en las que se depositaron sedimentos de origen lacustre y fluvial; los anteriores se encuentran intercalados con productos volcánicos de otras secuencias. En la zona norte y centro se encuentran sucesiones gruesas y compactadas de conglomerados y areniscas que están sobreyacidas por lavas y tobas del Oligoceno; en la parte sur el relleno sedimentario que data del Mioceno está compuesto por conglomerados, gravas, arenas, areniscas y en algunos casos margas, calizas y pedernal (Nieto-Samaniego et al., 1999).

### 2.2.3 Estratigrafía Local

#### *Sucesión sedimentaria Cretácica*

En la porción centro-occidental del semigraben aflora una sucesión predominantemente clástica que consiste en areniscas con intercalados de conglomerados y lutitas; la cima de esta sucesión está representada por estratos de espesor variable, desde 10 cm a 1 m de calizas recristalizadas; mientras que la base está compuesta por areniscas, conglomerados y lutitas de tonalidad rojiza, además, en esta base se encuentran fallas normales con rumbo NW-SE y NE-SW, y laterales con dirección NNE-SSW (Castillo-Reynoso, en desarrollo). Las areniscas presentan estructuras de degradación normal, grietas de desecación y contienen abundantes icnofósiles. Estas rocas sedimentarias se encuentran sobreyacidas discordantemente por rocas volcánicas de la SMO y están cortadas por intrusivos de composición intermedia.

#### *Volcanismo del Eoceno-Oligoceno*

En la porción nororiental del área de estudio, afloran andesitas de color gris oscuro con tonalidad violeta al intemperismo, las cuales presentan textura porfírica con fenocristales de plagioclasa y anfíbol; estas rocas se encuentran cortadas por intrusivos de composición intermedia y estos dos por vetas de cuarzo (Castillo-Reynoso, en desarrollo). Debido a que esta litología subyace a las ignimbritas del Oligoceno Temprano se correlacionan al Complejo Volcánico Inferior.

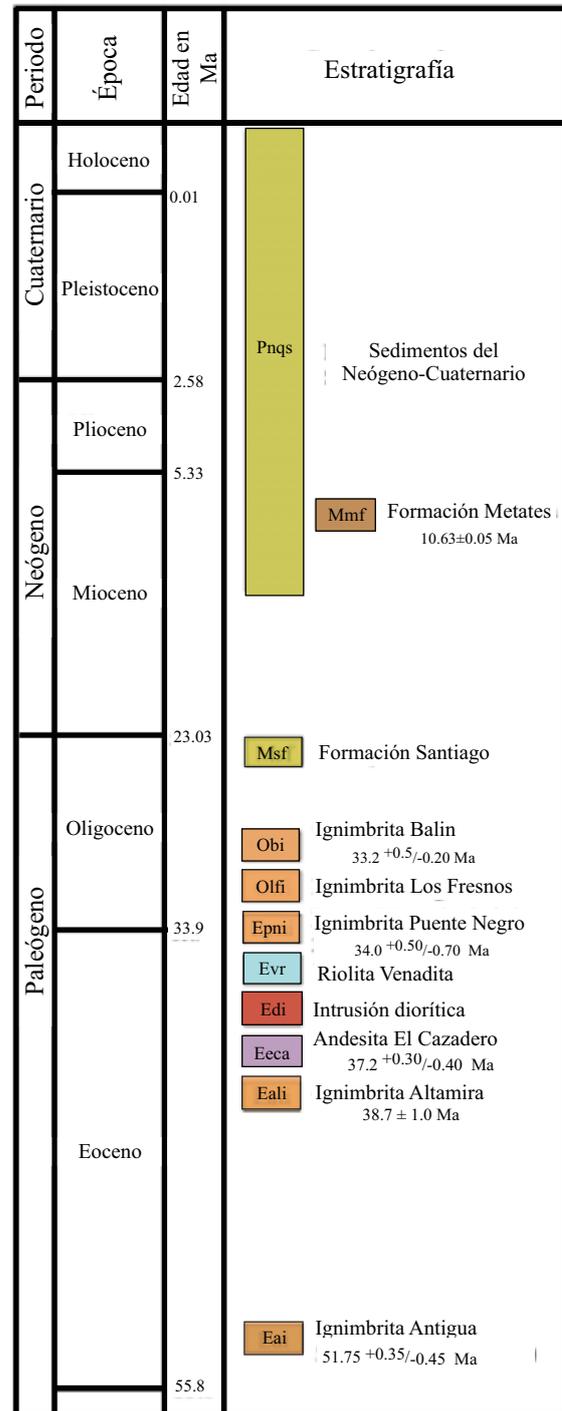


Fig. 2.3 Columna estratigráfica del semigraben de Santiago Papasquiari, modificada de (Loza-Aguirre et al., 2012) de acuerdo a la leyenda mostrada en la Fig. 4.5.

Las rocas volcánicas que afloran en la región de Santiago Papasquiario están conformadas principalmente por la secuencia volcánica del Oligoceno de la Sierra Madre Occidental, esta consiste en ignimbritas y tobas de flujos de ceniza de composición félsica, cuyas edades van del Eoceno Temprano al Oligoceno Temprano; con cristales de cuarzo y feldespato, y como líticos predominantes volcánicos félsicos y en menor cantidad andesíticos porfíricos ([Castillo- Reynoso, en desarrollo](#)). Las rocas piroclásticas forman sierras alargadas con rumbo NNW- SSE en el hombro oriental y occidental del semigraben, que corresponde a la litología fracturada por la cual ocurre parte de la recarga y almacenamiento del acuífero Tepehuanes- Santiago, y cuyo decaimiento radioactivo de los elementos inestables produce un sistema geotérmico no convencional, con flujos de agua de temperaturas iguales o mayores a 30°C.

Por las diferentes características que se pueden encontrar a lo largo del semigraben en el trabajo de [Loza- Aguirre et al. \(2012\)](#), Fig. 2.3, se separó el volcanismo del Eoceno- Oligoceno en “Ignimbrita Antigua” conformada por rocas piroclásticas silíceas con pómez moderadamente planas en la parte norte de Santiago Papasquiario, “Ignimbrita Altamira” al este y sureste con clastos máficos y pómez altamente aplanadas, “Andesita El Cazadero” de lavas intercaladas con brecha, tobas y depósitos continentales con fragmentos de andesita que aflora en la zona sureste, en el poblado de El Cazadero, “Intrusiones dioríticas” contenidas en la litología anterior con plagioclasa y anfíbol, “Riolita Venadita” que se le nombra a un conjunto de domos ricos en cuarzo y feldespato potásico que sobreyacen a las andesitas El Cazadero y a las ignimbritas Altamira, el depósito masivo piroclástico “Ignimbritas Puente Negro” que aflora desde el norte hasta el este de la población Los Herrera, “Ignimbritas Los Fresnos” constituidas por depósitos piroclásticos de flujo y caída con pómez sin aplanar y moderadamente aplanadas en la zona este y noreste de Santiago Papasquiario, mientras que al oeste “Ignimbrita Balin” con orificios de 10 cm dejados por pómez erosionadas .

La secuencia de andesita consiste en una intercalación de lava andesítica, brecha y toba, así como depósitos clásticos continentales; mientras que la intrusión diorítica aflora al oeste-suroeste de Los Herrera e intrusión a las andesitas; en cuanto a la riolita, esta se encuentra en forma de domos de lava que coronan a las ignimbritas y andesitas, y, por su posición estratigráfica sobre depósitos sedimentarios siliciclásticos al oeste de Santiago Papasquiario [Castillo- Reynoso \(en desarrollo\)](#) sitúa estas rocas en el Oligoceno Tardío, mientras que [Loza- Aguirre et al. \(2012\)](#) las consideran del Eoceno- Oligoceno Temprano debido a que se encuentra por debajo de las ignimbritas de Puente Negro y por sus similitudes con el domo riolítico en la región de Nazas, su matriz se encuentra viditrificada y presenta fracturas perlíticas observables en sección delgada.

### *Sucesiones Sedimentarias*

En el área de estudio se encuentran dos sucesiones sedimentarias, la primera asignada al Oligoceno tardío, que consiste en capas rojas de conglomerados y areniscas con intercalaciones de depósitos piroclásticos, su base es predominantemente conglomerática y se vuelve arenosa hacia su cima, esta sucesión se encuentra basculada hacia el oeste y aflora principalmente en arroyos que se encuentran en la base del hombro occidental. La segunda sucesión sedimentaria sobreyace a las rocas volcánicas Oligocénicas y está compuesta por conglomerados y areniscas mal clasificados y poco consolidados, estos sedimentos se localizan en la parte central del semigraben y se observan estructuras de gradación normal, además de que estos depósitos forman amplias mesetas y geoformas con drenaje dendrítico; a esta unidad se le conoce como Formación Santiago y sobre esta se encuentran los basaltos equivalentes a la Formación Metates (Castillo- Reynoso, en desarrollo). De manera intercalada a la Formación Metates y sobreyaciendo a los sedimentos del Oligoceno Tardío existen depósitos lacustres, conglomerados y arenas que rellenan a la depresión de Santiago Papasquiari, estos sedimentos con un grosor estimado de 300 m y que pertenecen al Neogeno- Cuaternario fueron caracterizados por Loza-Aguirre et al. (2012) como materiales finos ricos en carbonatos, de colores claros con líticos y pómez aislados; también se encuentran conglomerados clastosoportados compuestos por rocas volcánicas y metamórficas.

Estas sucesiones sedimentarias corresponden al acuífero Tepehuanes- Santiago, en donde se recarga parcialmente y se almacena el agua subterránea, cuyas temperaturas frías se mezclan con las aguas termales provenientes de las ignimbritas en algunas zonas del área de estudio.

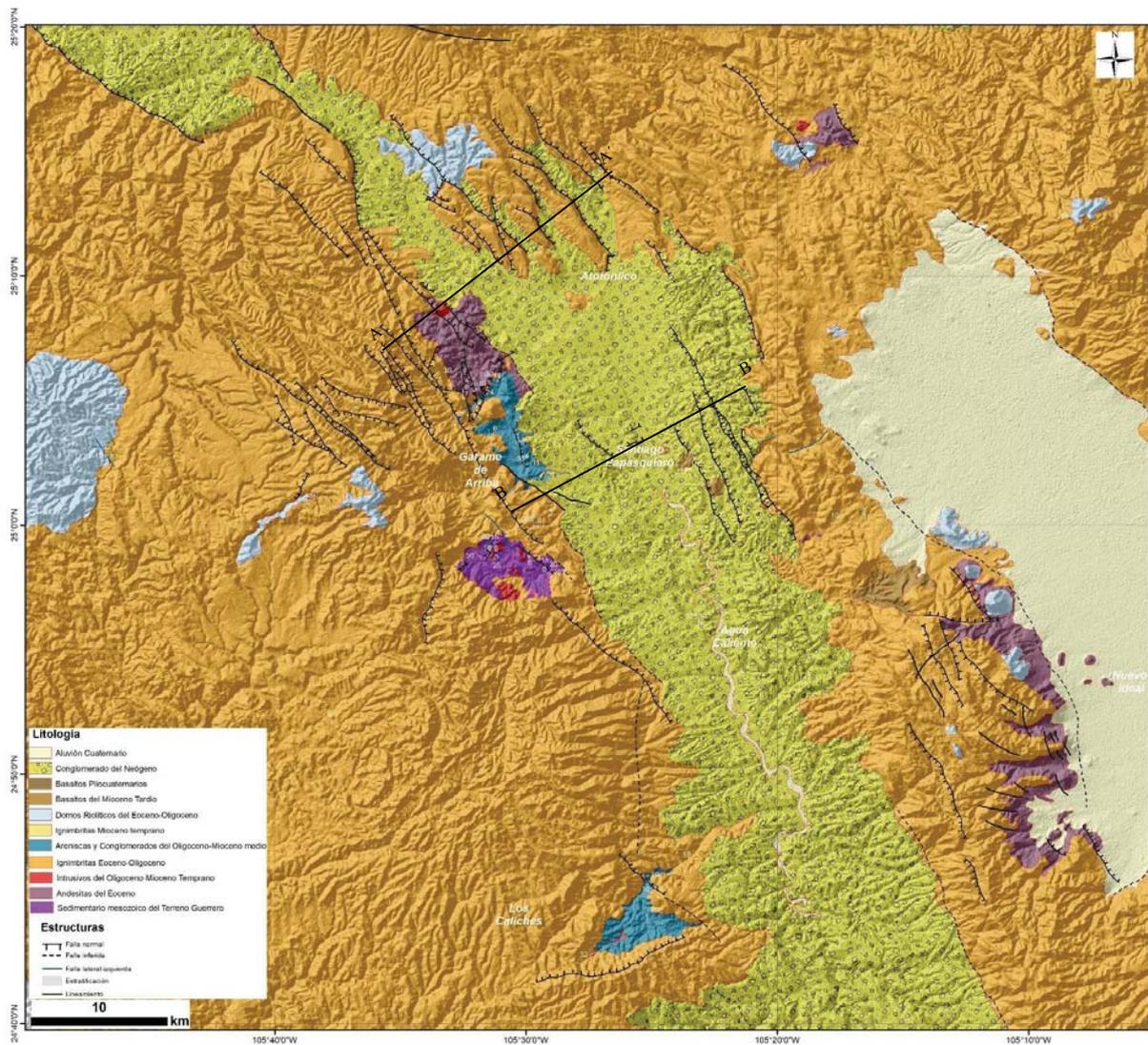
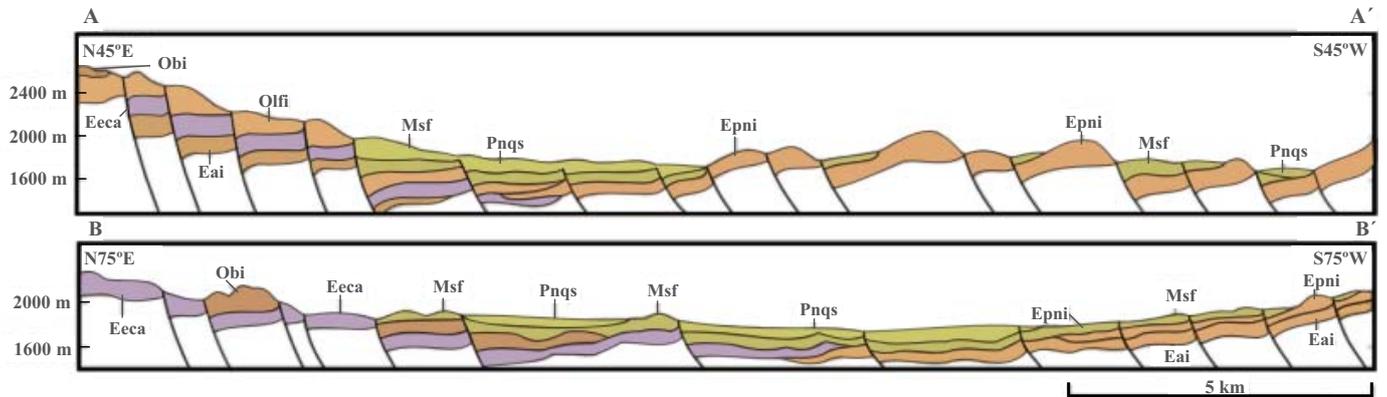


Fig. 2.4 Secciones transversales del valle de Santiago Papasquiario modificadas de (Loza- Aguirre et al., 2012) en las que se observa la estructura de bloques inclinados, la sección transversal A-A' corresponde al área de influencia del Sistema de Fallas San Luis Tepehuanes, y B-B' se encuentra ubicada a un par de km al norte del poblado de Santiago Papasquiario, de acuerdo a la leyenda mostrada en la Fig. 2.3. Y mapa geológico-estructural del Semigraben de Santiago Papasquiario (Castillo- Reynoso, en desarrollo).

## 2.3 Marco Hidrológico

### 2.3.1 Hidrología superficial

Al área donde se encuentra el semigraben, le corresponde el acuífero Tepehuanes- Santiago, designado con clave 1006 del Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza entre las coordenadas 24°19' y 25° 36' de latitud norte y 105° 00' y 116° 10' de longitud oeste, abarcando una superficie de 5087 km<sup>2</sup>. Limita al norte con el acuífero Matalotes- El Oro y Galeana- Quemado, al este con Valle de Santiaguillo y Valle de Canatlán, al sur con, Valle de Guadiana (Fig. 2.5) y Río Presidio, al oeste con Río Piaxtla, Río San Lorenzo y Río Culiacán, estos últimos cuatro acuíferos pertenecen al estado de Sinaloa, que tienen su zona de recarga en las partes topográficamente altas del estado de Durango (CONAGUA, 2018).

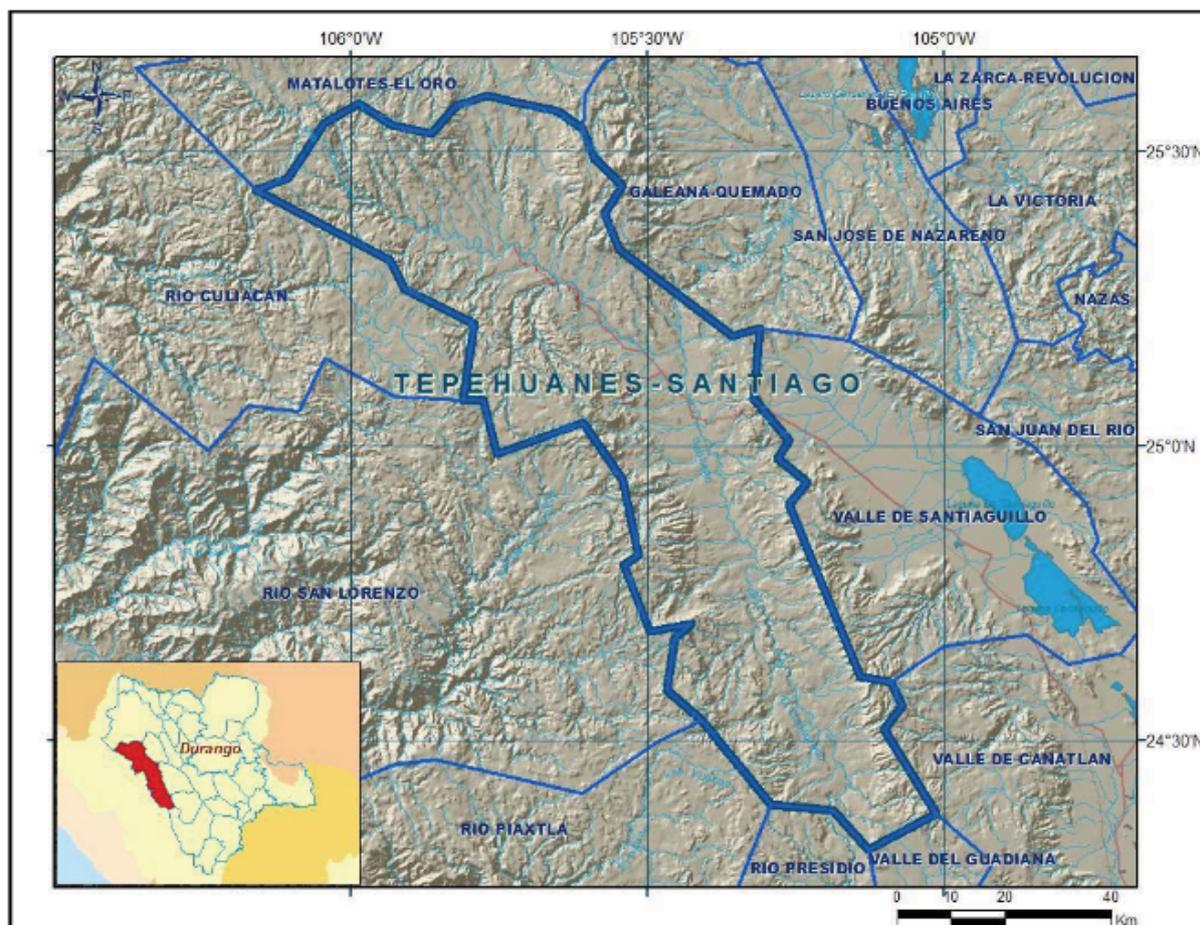


Fig. 2.5 Localización del acuífero Tepehuanes- Santiago (CONAGUA, 2018).

El acuífero se encuentra dentro de la cuenca Presa Lázaro Cárdenas, de igual manera forma parte de las subcuencas Río Santiago y Río Tepehuanes los cuales escurren hacia la Presa Lázaro Cárdenas, en el Río Nazas. Dentro de este acuífero se encuentra un sin número de corrientes superficiales, siendo las corrientes de mayor importancia el Río Tepehuanes, Río Santiago y Río Ramos, estos reciben aportación de pequeños arroyos intermitentes que derivan de las sierras de la región; es importante resaltar que el tercer río se forma a través de la unión de los dos primeros, posteriormente el Río Ramos une sus aguas con las del Río Oro en la presa Lázaro Cárdenas, en el Palmito, Durango, de aquí sale con el nombre de Río Nazas.

De acuerdo a [CONAGUA \(2018\)](#) el agua que fluye a través de los Ríos Tepehuanes y Santiago es parte del volumen almacenado en los materiales permeables del acuífero. Al tener ríos perennes con orígenes dentro del acuífero significa que parte del agua que fluye sobre éstos proviene de la almacenada en los depósitos de conglomerados y aluviales, durante la época de lluvias es por estas vertientes que el acuífero recibe sus recargas. En la localidad J. Salomé Acosta se ubica la estación hidrométrica del mismo nombre, la cual mide los escurrimientos del Río Ramos a unos kilómetros antes de salir de los límites del acuífero, el volumen medio anual escurrido es de 572,828,092.4 m<sup>3</sup>; mientras que el caudal base en metros cúbicos por segundo alcanza su mayor valor en el mes de septiembre con 1.54 y el menor en el mes de junio con 0.052.

## **Climatología**

Climatología refiere a las condiciones promedio que prevalecen en la atmósfera de una región del mundo cuando son considerados durante un periodo largo de tiempo (mayor a 10 años). De acuerdo con la clasificación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el clima que predomina en la zona del acuífero es del tipo estepario, variedades BS<sub>1</sub>kw(w), que es el menos seco de los secos. El subtipo es semiseco (1), su condición de temperatura (k) corresponde a templado con verano cálido, presenta una temperatura media anual entre 12 y 18° C, la media del mes más frío entre -3 y 18° C y la del más cálido > 18° C; el régimen de lluvia (w) indica que la temporada en la que se concentra la mayor cantidad de precipitación es en verano (mayo-octubre), mientras que el último término indica que su porcentaje de lluvia invernal es < 5. La variación de temperaturas puede observarse en la Fig. 2.6 y Fig. 2.7.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó información de ocho estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: Guanaceví, Ciénega de Escobar, San Miguel de Lobos, J. Salomé Acosta, Santiago Papasquiario, Tejaman, El Pino y Col. Ignacio Zaragoza, cuyo registro comprende los periodos 1922-2007, 1965-2007, 1961-2007, 1969-2007, 1938-2007, 1969-2003, 1963-2003 y 1970-2007, respectivamente. De acuerdo con estos datos y utilizando el método de los polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de 588.8 mm y 15.8° C, respectivamente; de igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de 1,661 mm anuales (CONAGUA, 2012). Sabiendo que la zona del acuífero es extensa, algunas de estas tienen mayor elevación que otras, con esto la parte norte (con mayor elevación al nivel del mar) es más húmeda que la parte sur de la zona de estudio.

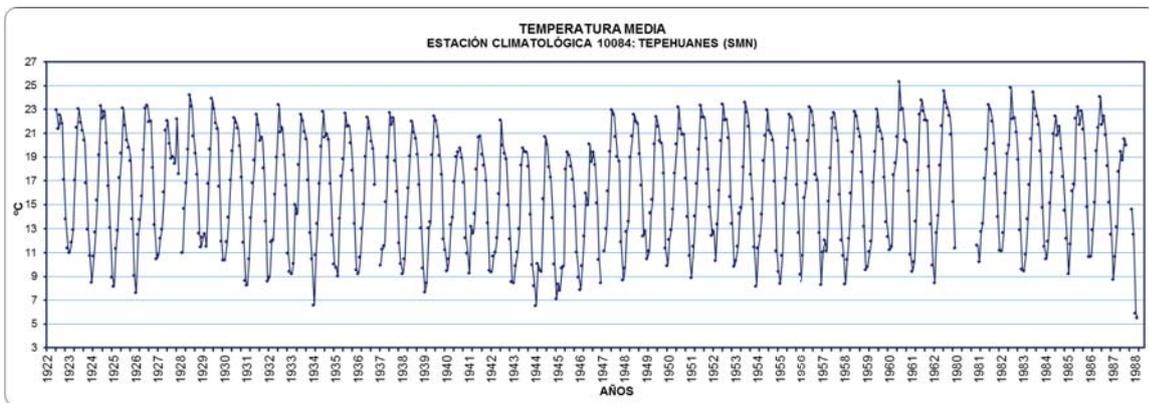


Fig. 2.6 Temperatura media, estación climatológica 10084: Tepehuanes (CONAGUA, 2018).



Fig. 2.7 Temperatura media, estación climatológica 10077: Santiago Papasquiario (CONAGUA, 2018).

## Principales usos del agua

Sobre el acuífero se encuentran 552 aprovechamientos superficiales donde 240 son bordos de almacenamiento, 231 manantiales, 81 son aprovechamientos directos sobre los principales arroyos, así como sobre los Ríos Santiago y Tepehuanes. Mientras que el volumen total concesionado de agua superficial es de 12,054,365.98 [m<sup>3</sup>] (CONAGUA, 2018).

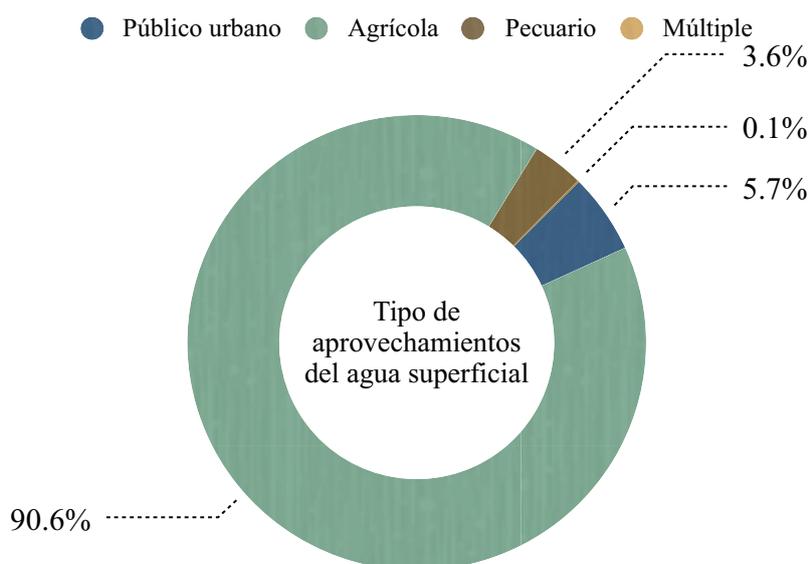


Fig. 2.8 Tipos de aprovechamientos del agua superficial, acuífero Tepehuanes- Santiago, fuente de datos CONAGUA, (2018).

## 2.3.2 Hidrología subterránea

### Acuífero

Según el análisis realizado por CONAGUA en el año 2010, se identificó que el acuífero Tepehuanes - Santiago es uno de tipo libre, heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales de granulometría variada y conglomerados cuyo espesor puede alcanzar varios metros en el centro del valle y su porción inferior por rocas volcánicas entre las que destacan tobas ácidas, riolitas e ignimbritas, y en menor proporción basaltos, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento (CONAGUA, 2018).



Fig. 2.9 Tipos de aprovechamientos del agua en el acuífero Tepihuanes- Santiago, fuente de datos CONAGUA,(2018).

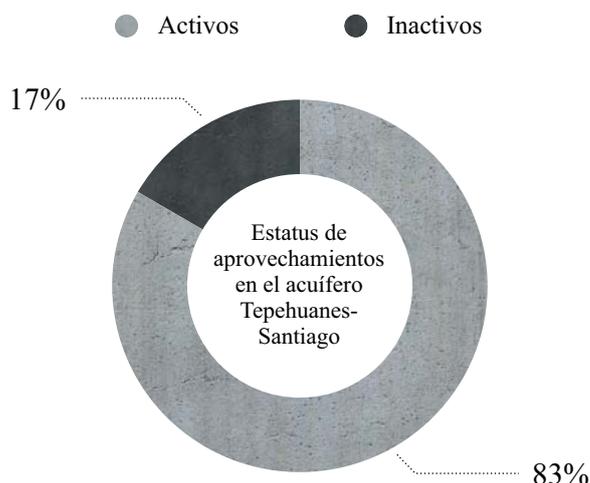


Fig. 2.10 Estatus de aprovechamientos en el acuífero Tepihuanes- Santiago, fuente de datos CONAGUA, (2018).

## Principales usos del agua

Conforme a la información de CONAGUA (2018) y de acuerdo con los datos del censo de aguas subterráneas realizado en el año 2010 por la Universidad de Sonora, se tienen registrados 193 aprovechamientos, de los cuales 117 son norias de poca profundidad, 75 están registrados como pozos profundos y solo uno de ellos no tiene identificado su tipo. De los cuales 17 norias, 14 pozos y el no identificado se encuentran inactivos.

De las obras activas, 105 de estos aprovechamientos se destinan para uso del hogar o también llamado doméstico (69 norias y 36 pozos), 17 para uso agrícola (7 norias y 10 pozos), 11 doméstico- pecuario (10 norias y 1 pozo), 10 para pecuario (6 norias y 4 pozos), 5 para agrícola-doméstico (pozos), 5 agrícola- pecuario (1 noria y 4 pozos), 3 para servicios (pozos), 2 para el sector industrial (pozos), 2 público- urbano (norias), 1 no identificado y 32 sin uso (17 norias y 14 pozos), lo anterior representado en la Fig.2.11.

Con una estimación de volumen total de extracción de 4.6 [hm<sup>3</sup>] anuales, de los cuales 2.1 [hm<sup>3</sup>] (45.6%) se destinan al uso agrícola, 2.4 [hm<sup>3</sup>] (52.2%) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, y los 0.1 [hm<sup>3</sup>] restantes (2.2%) se utilizan para satisfacer las necesidades de uso múltiple (CONAGUA, 2018).

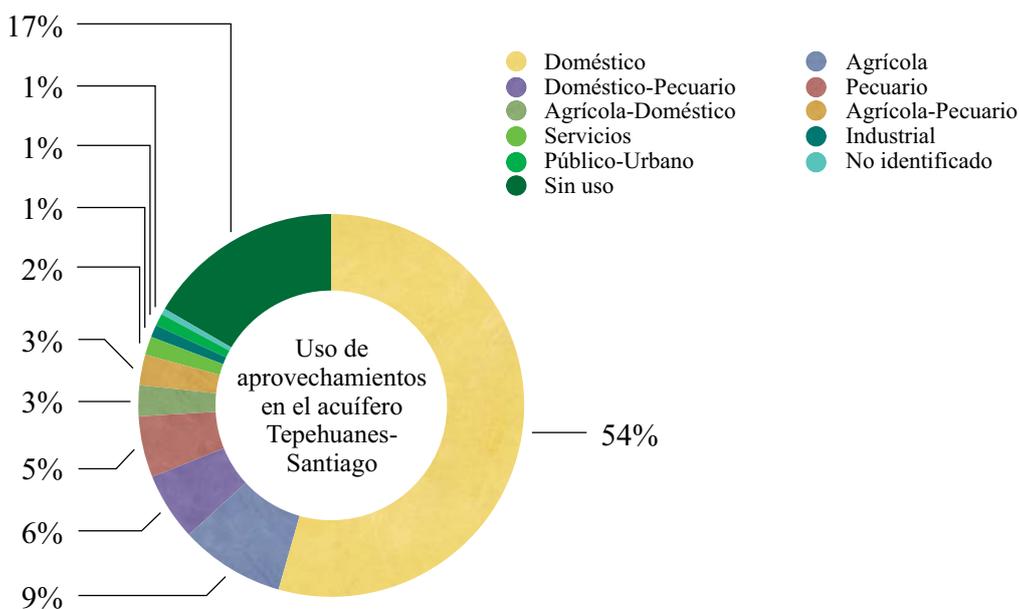


Fig. 2.11 Uso de aprovechamientos en el acuífero Tepehuanes- Santiago, fuente de datos CONAGUA, (2018).

El volumen total de extracción anual en el acuífero Tepehuanes-Santiago es de 4,545,178.22 [m<sup>3</sup>] al año. El 91.8 % de este volumen de extracción que corresponde a 4,170,944.3 [m<sup>3</sup>], se extrae mediante los pozos profundos y mientras que de las norias sólo se extrae el 8.2 % que corresponde a 374,233.9 [m<sup>3</sup>] por año. La principal utilidad que se le da al agua subterránea dentro del acuífero Tepehuanes-Santiago es el doméstico o que está destinado al hogar, con un

volumen de 4,010,240.8 [m<sup>3</sup>], mientras que para el uso agrícola se ocupan 377,350.8 [m<sup>3</sup>], el uso combinado de agrícola y pecuario utiliza un volumen de 58,859 [m<sup>3</sup>] y los demás usos se utilizan menos del 1% del volumen total de extracción anual dentro del acuífero (CONAGUA, 2018).

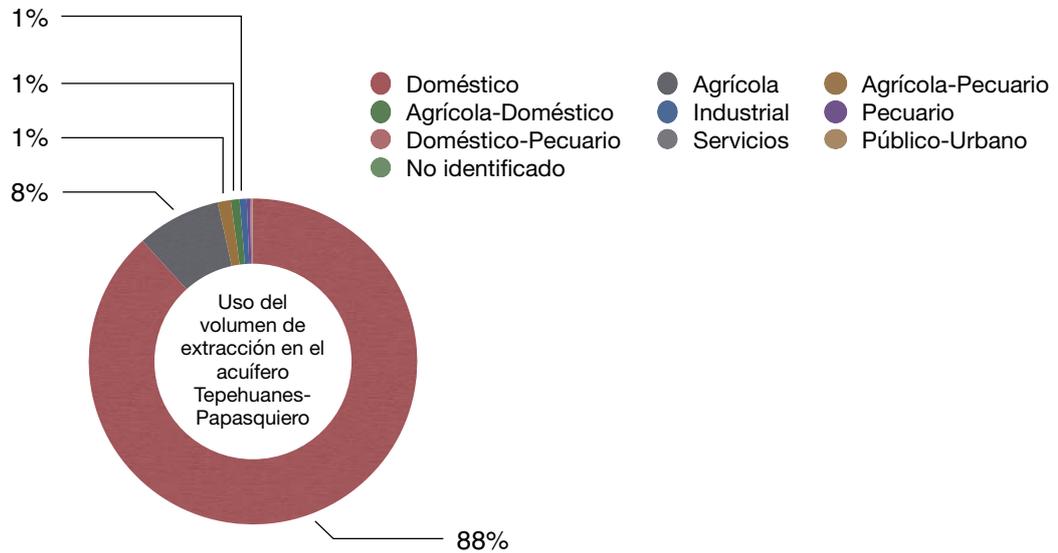


Fig. 2.12 Uso del volumen de extracción el acuífero Tepehuanes- Santiago, fuente de datos CONAGUA, (2018).

### 3. Métodos y materiales

#### 3.1 Revisión de información existente

Se realizó la recopilación de información de 188 aprovechamientos proveniente de estudios geológicos e hidrogeológicos realizados por la empresa SANX Ingeniería integral y desarrollo S.A. de C.V., para la CONAGUA y para el gobierno estatal de Durango en el 2010, en el área que comprende el semigraben.

Gracias a estos estudios se integró una base de datos para definir los procesos para una adecuada caracterización hidrogeológica. En esta base de datos se definieron los siguientes campos mostrados en la Tabla 3.1, construida a partir de la información previa y la obtenida en el trabajo de campo; en cada parámetro se consideraron los datos más actualizados.

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
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, es decir P= pozo, N= noria y M= manantial; los números consecutivos refieren a la numeración asignada a cada aprovechamiento.
CVE_CNA	Registra una clave otorgada por CONAGUA con la cual se identifican todos los aprovechamientos localizados en estudios previos.
Tipo_Apv	Registra el tipo de aprovechamiento, si es Noria, Pozo.
Loc	Nombre del poblado grande más próximo.
Uso	Uso del aprovechamiento.
X	Longitud del aprovechamiento en coordenadas UTM
Y	Latitud del aprovechamiento en coordenadas UTM
MDE_ASTER	Elevación del relieve en la ubicación del aprovechamiento según el modelo ASTER, en [msnm].
A/I	Condición de actividad o inactividad.
Prof	Profundidad total del pozo en [m].
ENE_2019	Elevación de nivel estático del aprovechamiento en [msnm] del año 2010.
PNE_AA	Profundidad al nivel estático del aprovechamiento en [m] del año AA.
PND_AA	Profundidad al nivel dinámico del aprovechamiento en [m] del año AA.
Obs	Observaciones

Tabla. 3.1 Descripción de campos considerandos en la base de datos general del proyecto.

### 3.2 Configuración piezométrica del acuífero

La información recabada de manera preliminar a partir de los informes de la región arrojó en total 188 aprovechamientos de los cuales 73 son pozos y 115 norias. Una vez organizada esta información se efectuó un análisis a detalle y posteriormente se descartaron algunos de estos aprovechamientos, lo anterior a partir de las inconsistencias detectadas en algunos datos como el PNE y ENE; debido a la magnitud del graben, se planearon rutas estratégicas y con ello puntos específicos para realizar mediciones en campo, esto basado en la cercanía entre sitios de aprovechamiento y el acceso desde carreteras o terracerías.

La visita a campo se realizó del 25 al 30 de Julio de 2019, se empleó una sonda eléctrica de 70 [m] y 200 [m] para verificar la profundidad al nivel estático del agua (PNE) de un total de 36 aprovechamientos, 22 pozos y 14 norias, en los otros 11 que corresponden a manantiales no se requirió de esta herramienta de medición ya que estos se encontraban en superficie. Cabe destacar que solo 13 de los 47 aprovechamientos analizados en campo, correspondían a alguna clave de identificación de CONAGUA, los 34 restantes fueron inéditos; además, la mayoría de los aprovechamientos no se encontraban en las coordenadas establecidas en los informes previos y si se encontraba alguno, la clave no correspondía a la establecida en estos documentos. Información recapitulada en la primer Tabla 7.1 de la sección de Apéndices.

Se realizaron dos perfiles a lo largo del semigraben, para observar de manera general la dirección del agua subterránea (Fig. 4.4).

Posteriormente, a partir de la información obtenida en campo se configuró una primer versión de la red de flujo, para ello se utilizó el software Surfer 13 (Surfer 13, 2015), al ser el graben de área muy extensa, la red de flujo contenía ciertas inconsistencias ya que algunas zonas se encontraban sin dato; para llenar estos huecos se obtuvo una correlación lineal entre la elevación del relieve en la ubicación del aprovechamiento según el modelo ASTER (MDE\_ASTER) (ASTER GDEM Validation Team, 2009) y la carga hidráulica en el aprovechamiento, es decir, el resultado de restarle la profundidad del nivel estático (PNE) al dato de MDE\_ASTER.

A partir de esta correlación se obtuvieron 18 puntos extra, situados estratégicamente para obtener una visualización más amplia de la dinámica del flujo. Ya con estos datos unidos a los recaudados en campo se realizó la red de flujo, primeramente se utilizó el software Surfer 13 para generar las mallas y a partir de esta, en el programa Qgis 3 (Team, 2002) se formó el raster a partir del cual se crearon equipotenciales, mismas que fueron analizadas y modificadas

cuidadosamente para ajustar al relieve y geología del semigraben. Cabe destacar que debido a los pocos datos obtenidos de pozos, se utilizó la información recopilada de norias como apoyo para adecuar el seguimiento de las líneas equipotenciales.



Fig. 3.1 Trabajo de campo con el Ing. Arias Paz, Mancera Alejandrez y el Lic. Macías Medrano, medición de profundidad al nivel estático. Julio 2019.

### 3.3 Estimación de parámetros hidráulicos

Para la conceptualización de las aguas subterráneas es sumamente importante conocer los parámetros hidráulicos del subsuelo, para esto es necesario llevar a cabo pruebas de bombeo que permitan obtener datos confiables.

Las pruebas de bombeo reinterpretadas se tomaron de previos estudios publicados por CONAGUA en el 2010. En este se llevaron a cabo 3 pruebas de bombeo y recuperación, dos al norte de Santiago Papasquiaro y uno al sur del mismo, estos pozos se identificaron con los nombres de: Tepehuanes pozo 1, El Tambor y San José de Favelas; cuyas profundidades totales corresponden a 80, 100 y 100 [m] respectivamente, una profundidad al nivel estático de 7, 4.95 y 17.65 [m], y 28.06, 25.79 y 58.48 del nivel dinámico, una duración de la etapa de bombeo de 135, 150 y 120 [min], y 75, 210 y 150 [min] en la etapa de recuperación, mientras que tienen un dato de Q (caudal de extracción) de 35, 3 y 1 [lps], con un diámetro de perforación de 12, 8 y 8 [in], y 4, 3 y 2 [in] de diámetro del pozo (CONAGUA, 2018). La ubicación de dichos pozos se encuentran en la Fig. 3.2.

## PRUEBAS DE BOMBEO

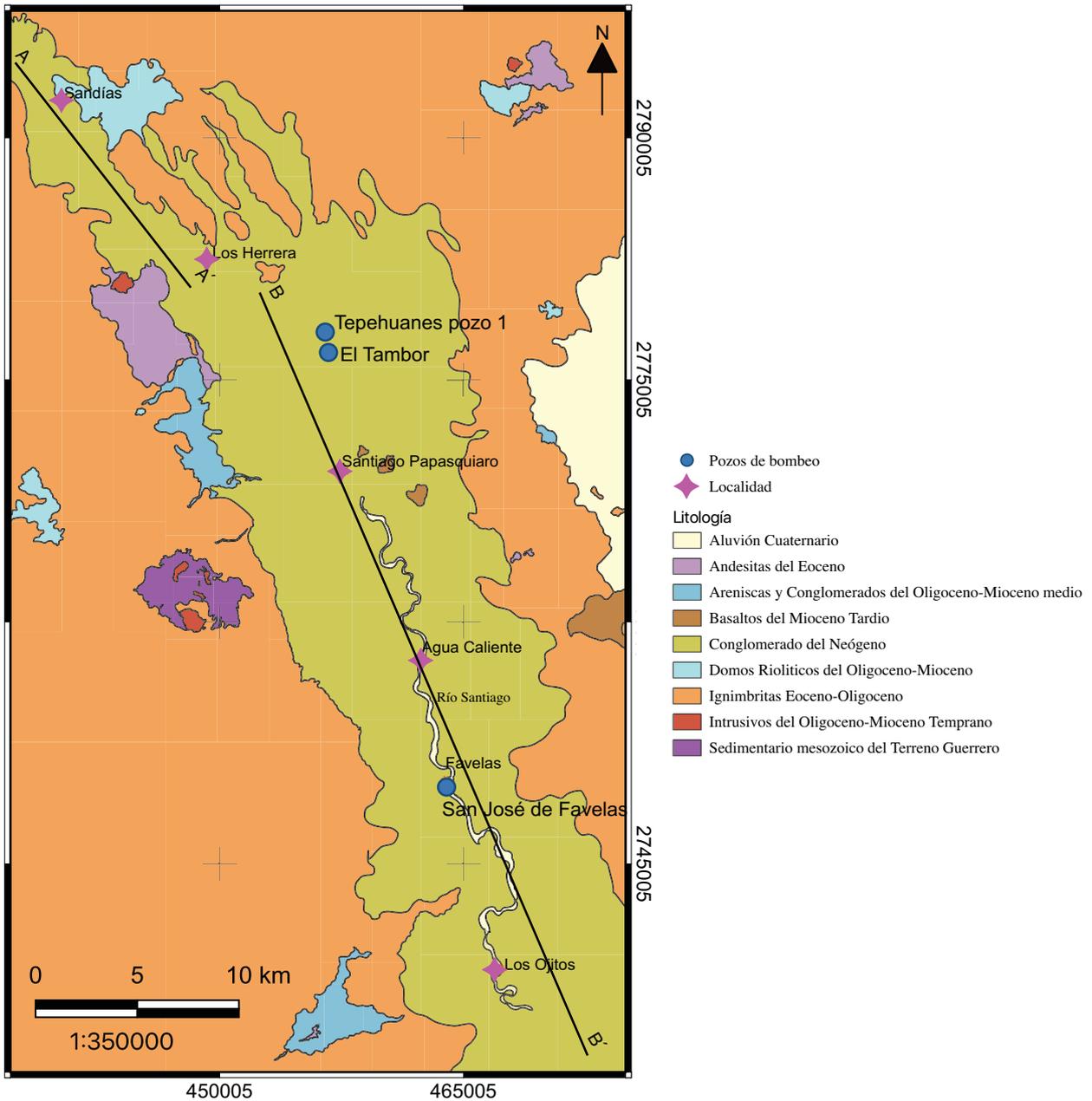


Fig. 3.2 Localización de los pozos de bombeo y perfiles expuestos de la Fig. 4.4. Base geológica adaptada de Castillo- Reynoso (en desarrollo).

Para la interpretación de las pruebas primeramente se realizó una comparación de las curvas tiempo vs. abatimiento ( $t-s$ ) reportadas por Kruseman & De Ridder (1990) y mostradas en la Fig. 3.3, con respecto a los diferentes modelos teóricos; gracias a esto se pueden identificar las condiciones hidráulicas generales que condicionan al flujo de agua subterránea hacia un pozo radial y totalmente penetrante. Las gráficas de los datos obtenidos de las pruebas se presentarán posteriormente.

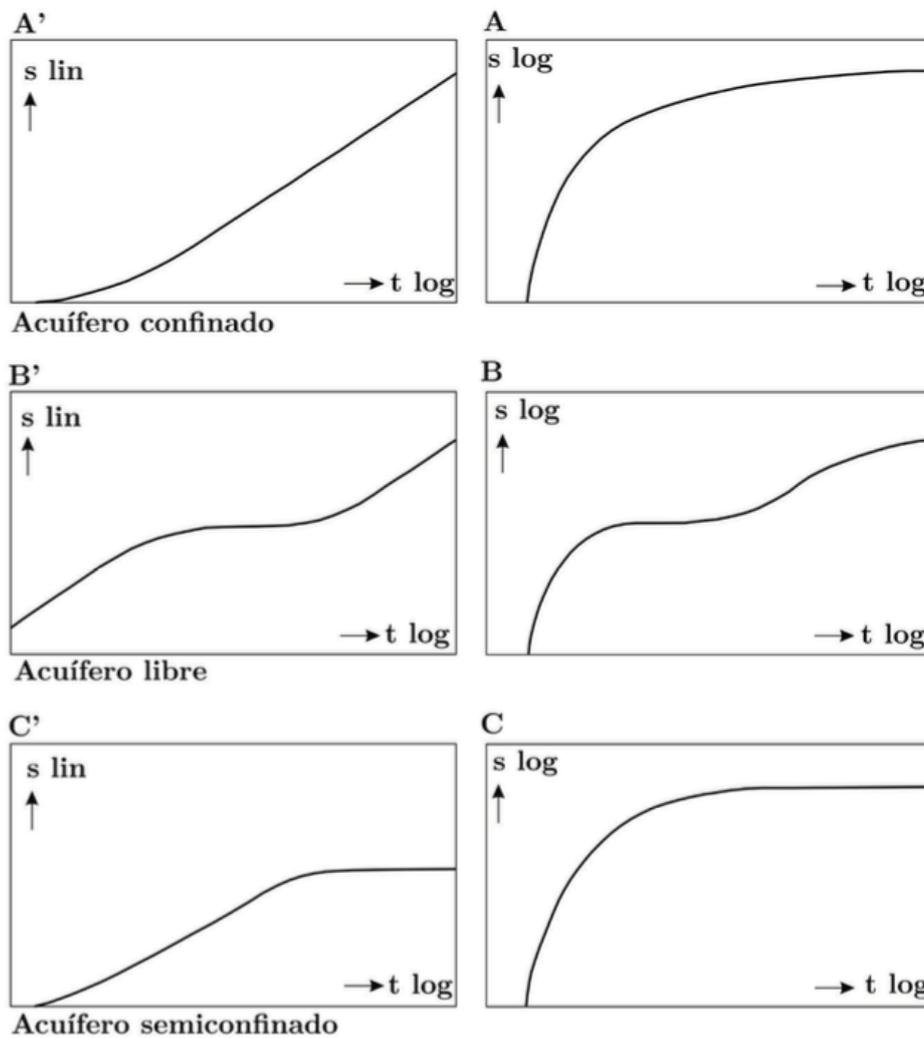


Fig. 3.3 Modelos teóricos de relación tiempo vs. abatimiento en sistemas- acuíferos granulares sin consolidar (Kruseman & De Ridder, 1990).

Para la interpretación de los ensayos de bombeo y recuperación se emplearon diferentes herramientas, en primer lugar se utilizó *AquiDplot* (Hernández-Espriú et al., 2018) para observar el comportamiento de las curvas diagnóstico (derivada logarítmica del abatimiento) correspondientes a cada pozo; posteriormente se ingresaron los datos de las pruebas al software *AQTESOLV* (Glenn M., 2007), en el que se pudieron analizar las pruebas completas, es decir, el abatimiento y la recuperación juntos, dando un panorama más amplio en el mecanismo del agua subterránea. En este software, para definir el modelo correspondiente, se examinó su afinidad con cada una de las pruebas; los métodos de solución que se emplearon fueron: Theis (abatimiento y recuperación) (Theis, 1935), Cooper- Jacob (Cooper Jr & Jacob, 1946), Renard (Renard et al., 2009), Neuman (Neuman, 1974) y Moench (Moench, 1985), de igual forma para una mejor interpretación se tomaron los trabajos de Agarwal (1980) y, el de Tago y Hernández-Espriú (2017).

### **3.4 Obtención de parámetros fisicoquímicos del agua**

Para tener una completa caracterización hidrogeológica también es importante conocer las propiedades fisicoquímicas del agua, tanto subterránea como superficial. Para ello se empleó un medidor multiparamétrico HANNA HI 9828 en muestras de agua de 25 aprovechamientos, este dispositivo permitió obtener datos de temperatura [°C], conductividad eléctrica [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ], sólidos disueltos totales [ppm], potencial de hidrógeno y potencial de oxidación- reducción [V], información recopilada en la Tabla 7.2 de la sección de Apéndices.

Para garantizar un análisis adecuado se utilizó agua destilada al enjuagar los sensores del medidor entre cada toma de evidencia, esto por medio de una pipeta, además de tomar la muestra lo más cercano al punto de salida del manantial, y en el caso de pozos y norias se realizó aproximadamente 5 [s] después del inicio del bombeo o a una profundidad media, procurando la muestra obtenida fuera lo más homogénea posible. A pesar de que este instrumento obtenía la temperatura de la muestra, también se hizo uso de un termómetro de mercurio, para medir directamente la temperatura de los manantiales y que el resultado no se viera modificado por el clima del ambiente.



Fig. 3.4 Sondeos de campo utilizando un termómetro de mercurio, el medidor multiparamétrico HANNA HI 9828 y una toma de muestra, Julio 2019.

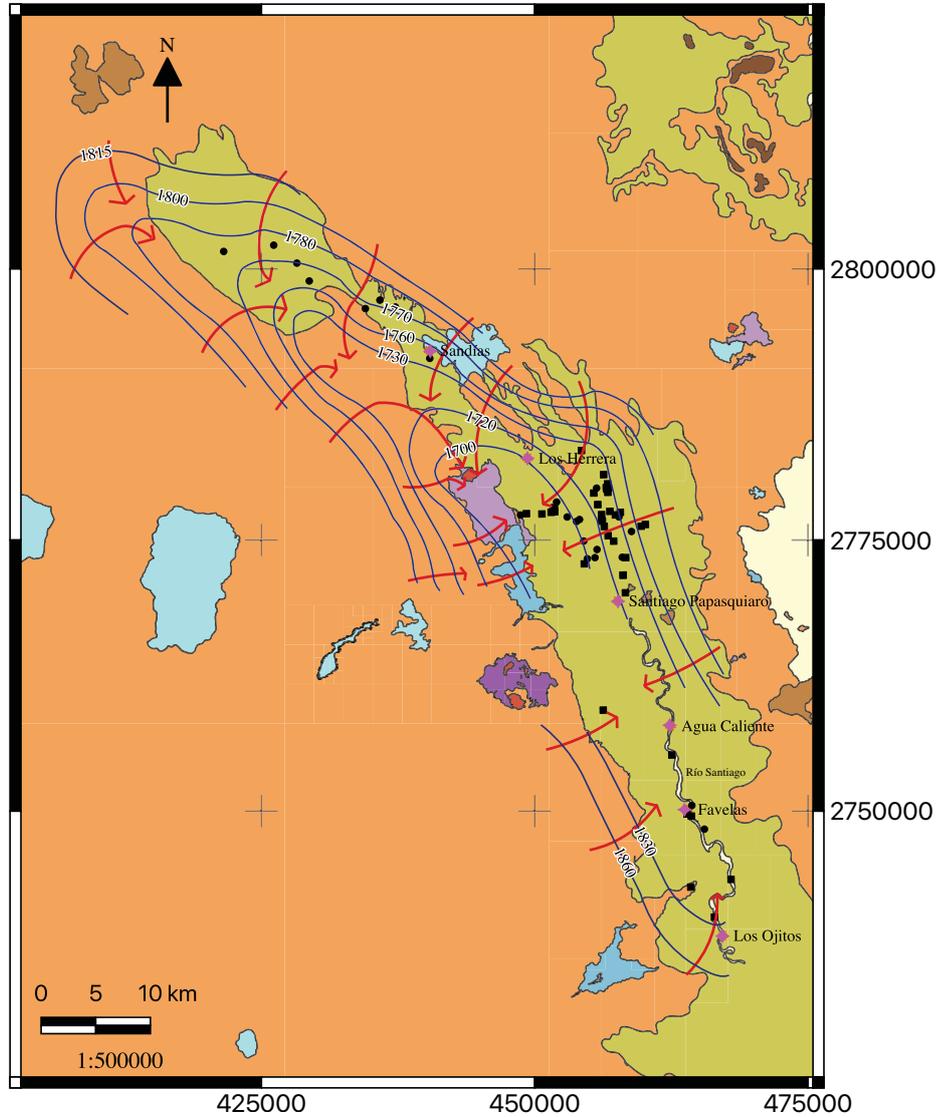
## 4. Resultados y discusión

### 4.1 Configuración piezométrica

En el 2018 se realizó la Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Tepehuanes- Santiago realizado por la empresa SANX Ingeniería Integral y desarrollo S.A. de C.V., para la Comisión nacional del agua (CONAGUA); el cual tuvo como objetivo general renovar el conocimiento de las condiciones hidrogeológicas y con ello establecer una evolución de los niveles del agua, así como contar con la información necesaria para determinar la disponibilidad media anual del agua.

Consistió en actualizar datos por medio del censo de captaciones de agua subterránea, obtener los valores de parámetros físicos e hidráulicos que rigen el movimiento del agua en el subsuelo, así como determinar el volumen de extracción de aguas subterráneas para sus diferentes usos en la región. Aunque estos valores fueron actualizados, la red piezométrica no fue modificada, por lo que se sostenía la obtenida en el año 2010 por la misma institución, como se presenta en la siguiente figura.

## CARGA HIDRÁULICA CONAGUA 2010



◆ Localidad

### Litología

- Aluvión Cuaternario
- Andesitas del Eoceno
- Areniscas y Conglomerados del Oligoceno-Mioceno medio
- Basaltos del Mioceno Tardío
- Basaltos Pliocuatrnarios
- Conglomerado del Neógeno
- Domos Riolíticos del Oligoceno-Mioceno
- Ignimbritas Eoceno-Oligoceno
- Intrusivos del Oligoceno-Mioceno Temprano
- Sedimentario mesozoico del Terreno Guerrero

### Elevación de Nivel Estático

- Carga hidráulica [msnm]
- Dirección de flujo

### Aprovechamientos

- Pozo
- Noria

Fig. 4.1 Carga Hidráulica de acuerdo a CONAGUA en el 2010, editada por la autora en el 2020. Base geológica adaptada de Castillo- Reynoso (en desarrollo).

Basado en esta información se realizó el trabajo de campo del 25 al 30 de Julio de 2019, durante estos días se obtuvieron diversos resultados de nivel piezométrico y resaltó que los datos previamente visualizados en el trabajo anterior eran poco confiables, ya que en su mayoría el aprovechamiento no existía o no correspondía con la señalización previa. Debido a esto, la primer red de flujo se realizó a partir de la información obtenida en campo, teniendo como resultado la Fig. 4.3. A falta de información y coherencia con la geología y relieve, se decidió utilizar un modelo de correlación lineal entre la topografía y la carga, que se validó con el coeficiente de Pearson, como se muestra en la Fig. 4.2, cuyo resultado fue de 0.9684; lo anterior para obtener datos en lugares estratégicos y así conseguir una configuración piezométrica que corresponda de manera adecuada al semigraben.

A partir de las observaciones durante el trabajo de campo y el análisis geológico se realizaron dos perfiles a lo largo del área de estudio, uno que abarca la zona norte desde Santiago Papasquiario y otro hacia el sur del poblado, estos permitieron observar de manera general el comportamiento del agua subterránea, es decir, la dirección de esta a partir del relieve y geología del lugar (Fig. 4.4). Donde en la primera zona este curso es de norte a sur y de forma inversa en el área restante del semigraben.

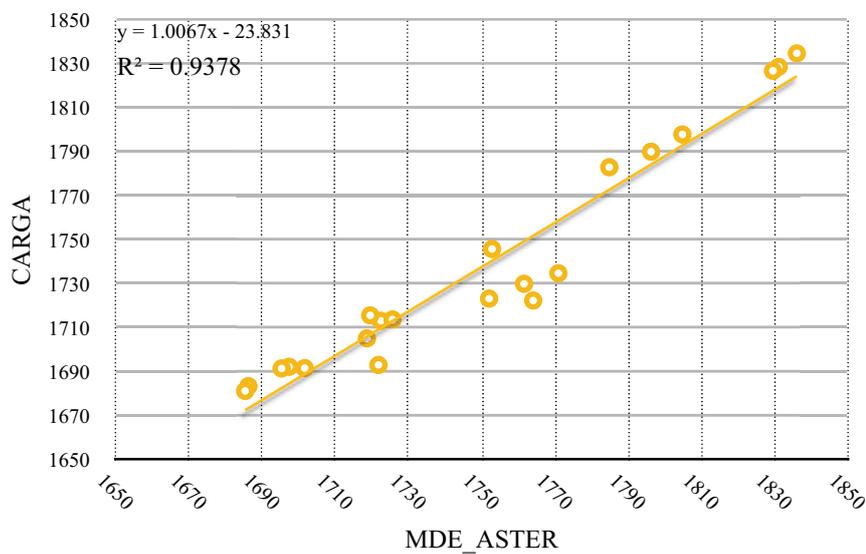
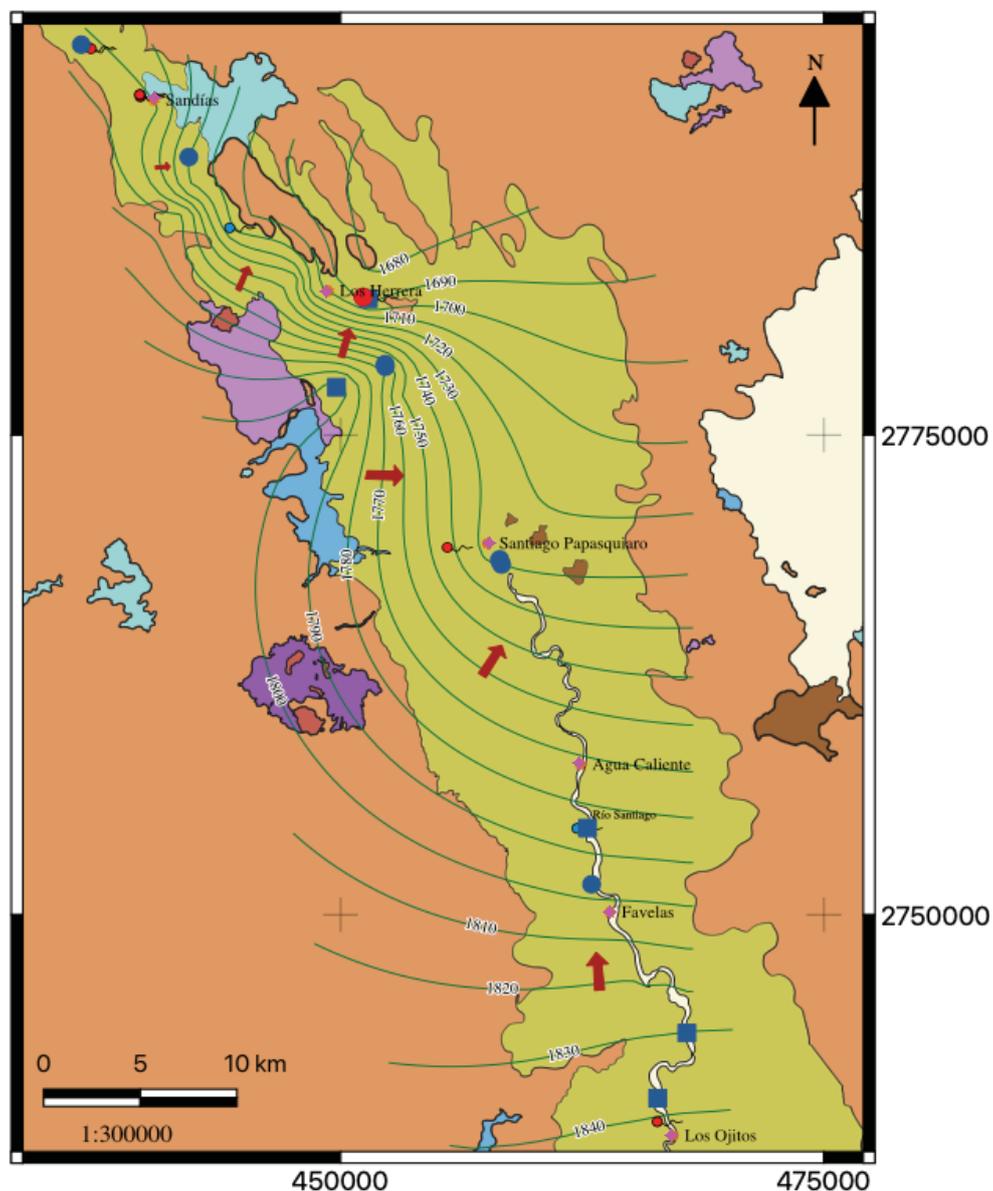


Fig. 4.2 Gráfico de relación MDE\_ASTER y CARGA de acuerdo a los datos medidos en campo, 2019.

CARGA HIDRÁULICA JULIO 2019



◆ Localidad

**Litología**

- Aluvión Cuaternario
- Andesitas del Eoceno
- Areniscas y Conglomerados del Oligoceno-Mioceno medio
- Basaltos del Mioceno Tardío
- Conglomerado del Neógeno
- Domos Riolíticas del Oligoceno-Mioceno
- Ignimbritas Eoceno-Oligoceno
- Intrusivos del Oligoceno-Mioceno Temprano
- Sedimentario mesozoico del Terreno Guerrero

**Elevación de Nivel Estático**

— Carga hidráulica [msnm]

➔ Dirección de flujo

**Aprovechamientos**

Temperatura ambiente

● Pozo

■ Noria

⊙ Manantial

Temperatura caliente (mayor a 30°C)

● Pozo

⊙ Manantial

Fig. 4.3 Carga Hidráulica configurada por la autora, Julio 2019. Base geológica adaptada de Castillo- Reynoso (en desarrollo).

Con la información anterior y la inclusión de datos a partir del modelo de correlación lineal, se elaboró la configuración piezométrica representada en la Fig. 4.5, la cual permitió definir que los hombros del semigraben tiene un carácter semipermeable, es decir, que las ignimbritas que se encuentran en los hombros del semigraben no conforman una frontera impermeable, debido al régimen de fracturamiento y fallamiento de la región, esto ultimo mostrado en la Fig. 2.3. La recarga del acuífero ocurre tanto en los hombros del semigraben como a lo largo del relleno sedimentario, siendo este ultimo el más predominante.

#### Perfiles y flujo del agua subterránea a lo largo del semigraben de Santiago Papasquiario, Durango.

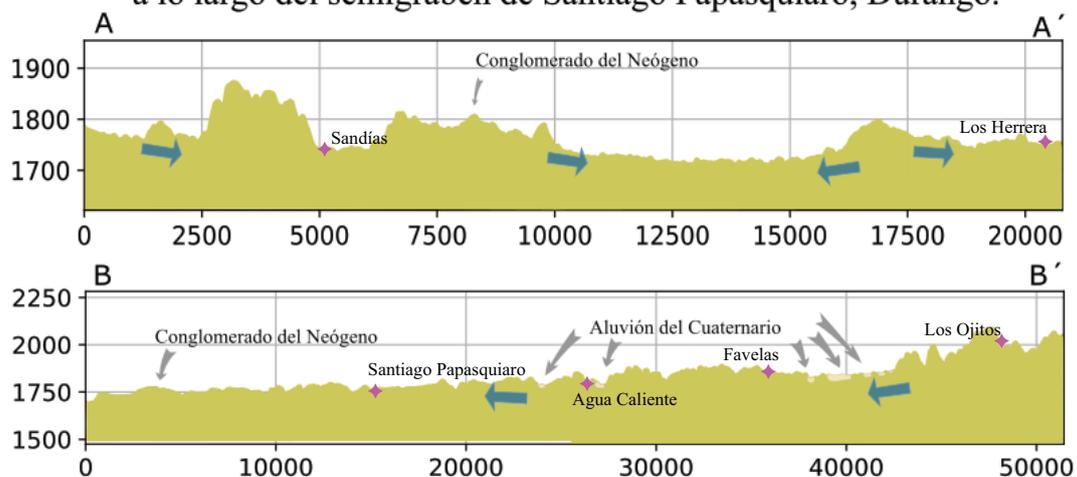
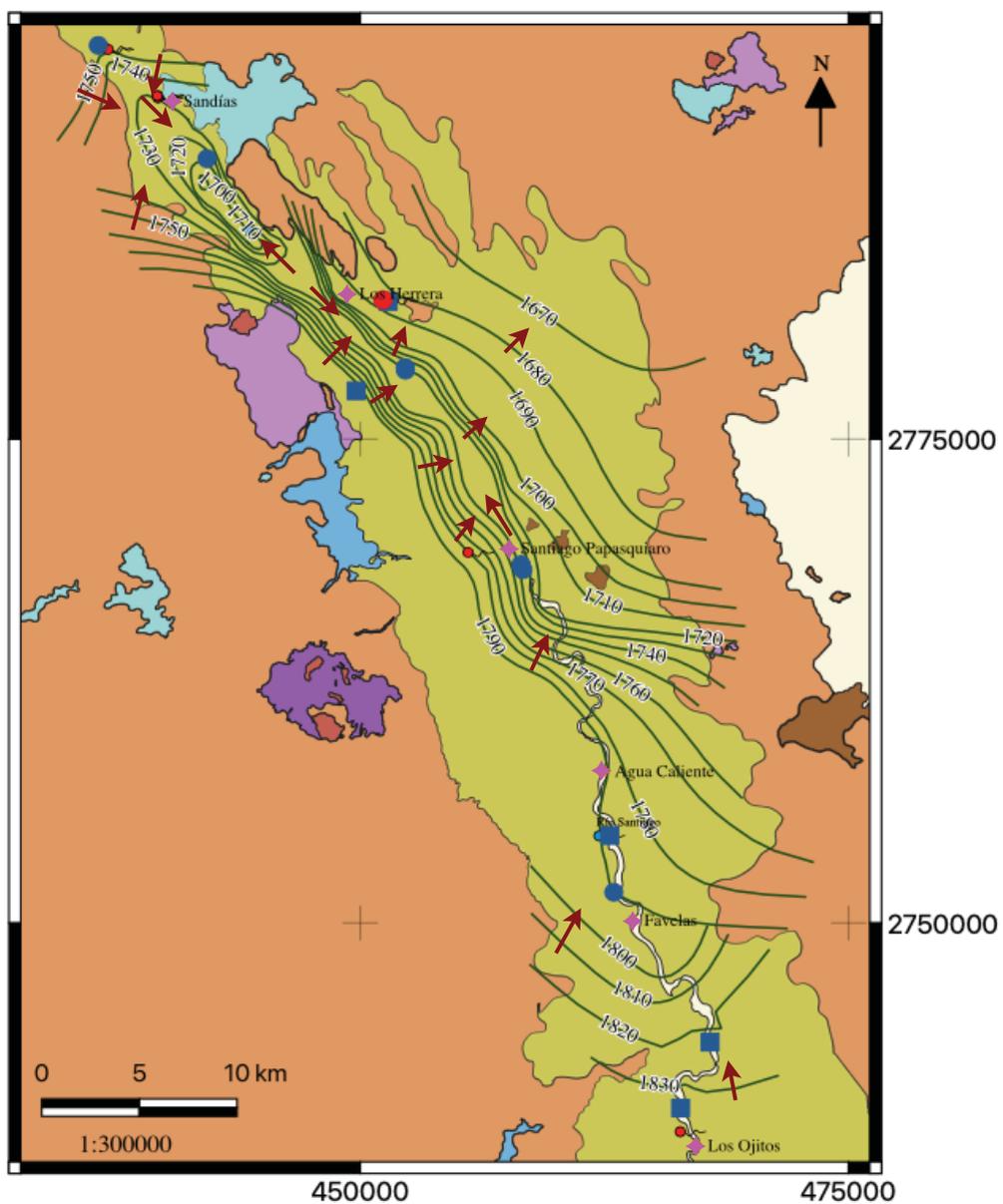


Fig. 4.4 Perfiles y flujo de agua subterránea a lo largo del semigraben de Santiago Papasquiario, 2020. La ubicación de estos se encuentra en la Fig.3.2. Localización de poblados proyectados en paralelo al perfil.

Al noroeste de la zona de estudio, entre las localidades de Sandías y Los Herrera, existe una depresión en la que el flujo tiende a dirigirse hacia su parte central, en esta área se combinan dos corrientes de manantial, por un lado el agua termal que proviene de la parte norte de Sandías con una temperatura de 65°C y por otro agua a 20°C que se dirige desde la parte sur de la depresión. Entre Los Herrera y Santiago Papasquiario se forman ligeros conos de abatimiento, correspondientes a las zonas de importante extracción del agua subterránea y a las localidades con mayor población de la región.

Dentro del semigraben la dinámica del flujo de carga hidráulica es variada, existen dos puntos donde diferentes aguas convergen, uno en la parte norte mencionado con anterioridad y otro en la porción central, al norte de Santiago Papasquiario; es aquí donde la corriente que se dirige desde la localidad de los Ojitos hacia el norte, se une con el flujo proveniente de Los Herrera, este territorio de mezcla no está localizado de manera puntual debido a la formación de los ligeros conos de abatimiento. Cabe destacar que se observa un gradiente hidráulico más espaciado porción oeste del semigraben, en donde son varios kilómetros los que separan las cargas hidráulicas, caso opuesto ocurre en las cercanías de Los Herrera, donde a pocas decenas de metros se encuentra diferente carga.

## CARGA HIDRÁULICA JULIO 2019



◆ Localidad

### Litología

- Aluvión Cuaternario
- Andesitas del Eoceno
- Areniscas y Conglomerados del Oligoceno-Mioceno medio
- Basaltos del Mioceno Tardío
- Conglomerado del Neógeno
- Domos Riolíticas del Oligoceno-Mioceno
- Ignimbritas Eoceno-Oligoceno
- Intrusivos del Oligoceno-Mioceno Temprano
- Sedimentario mesozoico del Terreno Guerrero

Elevación de Nivel Estático

- Carga hidráulica [msnm]
- ➔ Dirección de flujo

### Aprovechamientos

Temperatura ambiente

- Pozo
- Noria
- ⋯ Manantial

Temperatura caliente (mayor a 30°C)

- Pozo
- ⋯ Manantial

Fig. 4.5 Carga Hidráulica definitiva. Elaboración propia, Julio 2019.

## 4.2 Parámetros hidráulicos

### 4.2.1 Interpretación de pruebas de bombeo

La empresa SANX Ingeniería Integral y desarrollo S.A. de C.V., llevó a cabo 3 pruebas de bombeo en el área del semigraben de Santiago Papasquiario, en estas se realizó una etapa de abatimiento y una de recuperación; ensayos cuyos resultados fueron publicados por CONAGUA en el 2010 y que se presentan en la siguiente tabla.

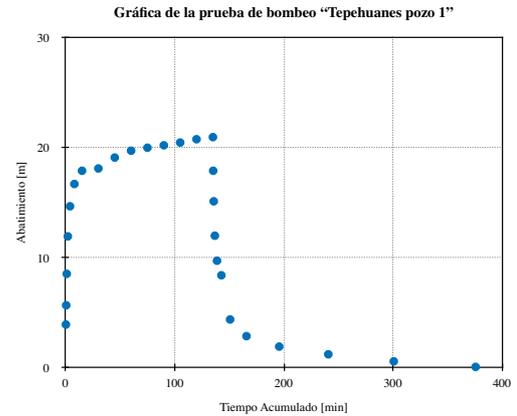
POZO	P. T. [m]	P.N.E. [m]	P.N.D. [m]	ABAT. T. [m]	Q [l/s]	BOMBEO			RECUPERACIÓN	
						Transmisividad		Coeficiente de almacenamiento	Transmisividad	
						[m <sup>2</sup> /d]	[m <sup>2</sup> /d]		[m <sup>2</sup> /d]	[m <sup>2</sup> /d]
TEPEHUANES POZO 1 (CNA-1006-161)	80	7	28.06	20.9	35	93.31	1.08E-03	0.01	80.784	9.35E-04
EL TAMBOR (CNA-1006-050)	100	4.95	25.79	20.84	3	5.27	6.11E-05	0.0279	5.78	6.69E-05
SAN JOSÉ DE FAVELAS (CNA-1006-012)	100	17.65	58.48	40.83	1	0.60	6.95E-06	0.0167	0.79	9.16E-06

Tabla. 4.1 Resultados de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas por la empresa SANX Ingeniería Integral y desarrollo por el método de Theis durante la etapa de abatimiento y Theis & Jacob para la recuperación, publicado por CONAGUA en el 2010.

De la cual P.T.: Profundidad total, P.N.E.: Profundidad al nivel estático, P.N.D.: Profundidad al nivel dinámico, ABAT. T.: Abatimiento total. O: Caudal de extracción.

Para una mayor precisión y mejora en la calidad de los resultados, se reinterpretaron las pruebas de bombeo mencionadas con anterioridad y representadas de la Fig. 4.6 a la Fig. 4.8 Para llevarlo a cabo, primeramente se utilizó *AquiDplot* (Hernández-Espríu et al., 2018), se separaron las etapas de abatimiento y recuperación para obtener un análisis a detalle a partir de sus respectivas derivadas.

PRUEBA DE BOMBEO: TEPEHUANES POZO 1			
Clave	CNA-1006-161	Duración Recuperación [min]	75
Localidad	Tepehuanes, pozo 1	Duración Total [min]	210
Tipo	Pozo	N.E [m]	7
X (UTM)	456499	N.D [m]	27.9
Y (UTM)	2777971	Abatimiento máx. [m]	20.9
Z [msnm]	1,709	Prof. Total [m]	80
Fecha	16/10/2010	Q [l/s]	35
Tipo	Pozo	Diám. perforación [in]	12
Duración Abatimiento [min]	135	Diámetro	4



Etapa	Tiempo [min]	Tiempo Acumulado [min]	P.N.D. [m]	Abatimiento [m]
ABATIMIENTO	0.25	0.25	10.90	3.90
	0.5	0.5	12.65	5.65
	1	1	15.35	8.50
	2	2	18.90	11.90
	4	4	21.63	14.63
	8	8	23.65	16.65
	15	15	24.85	17.85
	30	30	25.06	18.06
	45	45	26.05	19.05
	60	60	26.67	19.67
	75	75	26.94	19.94
	90	90	27.16	20.16
	105	105	27.41	20.41
120	120	27.71	20.71	
135	135	27.90	20.90	
RECUPERACIÓN	0.25	135.25	24.85	17.85
	0.5	135.75	22.08	15.08
	1	136.75	18.96	11.96
	2	138.75	16.69	9.69
	4	142.75	15.37	8.37
	8	150.75	11.36	4.36
	15	165.75	9.85	2.85
	30	195.75	8.90	1.90
	45	240.75	8.2	1.20
60	300.75	7.56	0.56	
75	375.75	7.06	0.06	

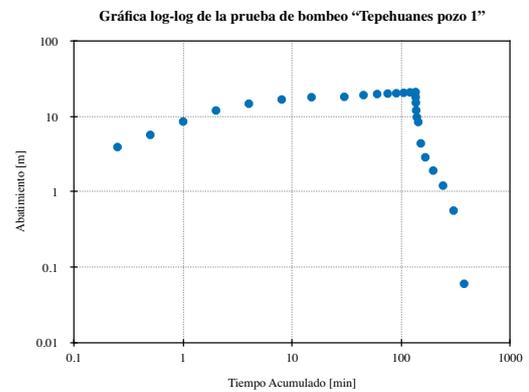
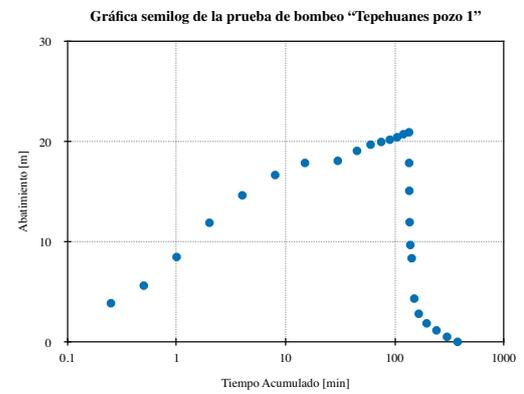
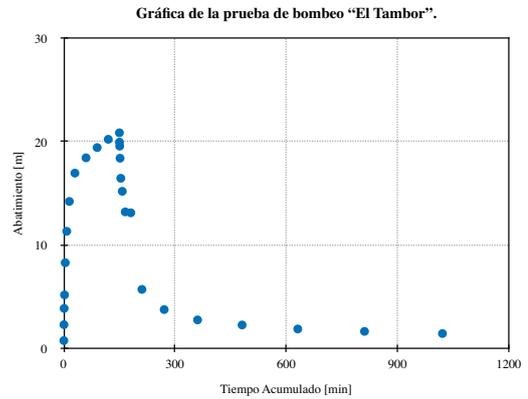


Fig. 4.6 Prueba de bombeo del pozo Tepehuanes pozo 1 (SANX, 2010) y sus relaciones tiempo-abatimiento.

PRUEBA DE BOMBEO: EL TAMBOR			
Clave	CNA-1006-050	Duración Recuperación [min]	210
Localidad	El Tambor	Duración Total [min]	360
Tipo	Pozo	N.E [m]	4.95
X (UTM)	456701	N.D [m]	25.16
Y (UTM)	2776707	Abatimiento máx. [m]	20.84
Z [msnm]	1,718	Prof. Total [m]	100
Fecha	10/10/2010	Q [l/s]	3
Tipo	Pozo	Diám. perforación [in]	8
Duración Abatimiento [min]	150	Diámetro	3



Etapa	Tiempo [m]	Tiempo Acumulado [min]	P.N.D. [m]	Abatimiento [m]
ABATIMIENTO	0.25	0.25	5.69	0.74
	0.5	0.5	7.23	2.28
	1	1	8.77	3.85
	2	2	8.80	5.16
	4	4	10.11	8.27
	8	8	13.22	11.31
	15	15	16.26	14.20
	30	30	19.15	16.94
	60	60	21.92	18.42
	90	90	23.37	19.41
RECUPERACIÓN	120	120	24.36	20.21
	150	150	25.16	20.84
	0.25	150.25	24.880	19.93
	0.5	150.75	24.500	19.55
	1	151.75	23.330	18.38
	2	153.75	21.390	16.44
	4	157.75	20.130	15.18
	8	165.75	18.140	13.19
	15	180.75	18.050	13.10
	30	210.75	10.640	5.69
	60	270.75	8.690	3.74
90	360.75	7.690	2.74	
120	480.75	7.200	2.25	
150	630.75	6.810	1.86	
180	810.75	6.580	1.63	
210	1020.75	6.370	1.42	

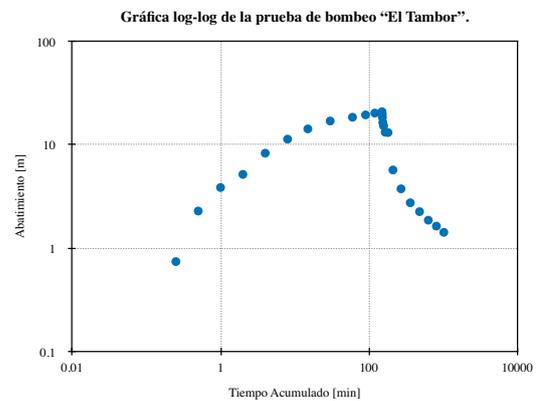
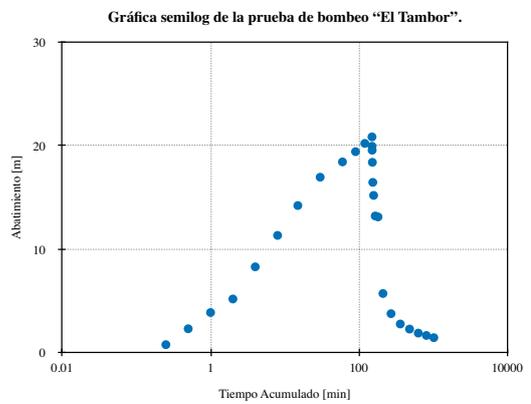
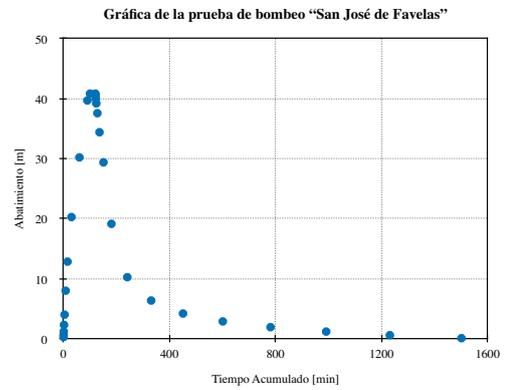


Fig. 4.7 Prueba de bombeo del pozo El Tambor (SANX, 2010) y sus relaciones tiempo-abatimiento.

PRUEBA DE BOMBEO: SAN JOSÉ DE FAVELAS			
Clave	CNA-1006-012	Duración Recuperación [min]	270
Localidad	El Tambor	Duración Total [min]	390
Tipo	Pozo	N.E [m]	17.65
X (UTM)	463964	N.D [m]	58.48
Y (UTM)	2749771	Abatimiento máx. [m]	40.83
Z [msnm]	1.806	Prof. Total [m]	100
Fecha	9/10/2010	Q [l/s]	1
Tipo	Pozo	Diám. perforación [in]	8
Duración Abatimiento [min]	120	Diámetro	2



Etapa	Tiempo [min]	Tiempo Acumulado [min]	P.N.D. [m]	Abatimiento [m]
ABATIMIENTO	0.25	0.25	17.95	0.300
	0.5	0.5	18.31	0.660
	1	1	18.87	1.220
	2	2	19.98	2.330
	4	4	21.68	4.030
	8	8	25.67	8.020
	15	15	30.51	12.860
	30	30	37.93	20.280
	60	60	47.86	30.210
	90	90	57.34	39.690
	100	100	58.48	40.830
RECUPERACIÓN	120	120	58.48	40.830
	0.25	120.25	58.24	40.59
	0.5	120.75	58.13	40.48
	1	121.75	57.64	39.99
	2	123.75	56.85	39.20
	4	127.75	55.22	37.57
	8	135.75	52.05	34.40
	15	150.75	47.03	29.38
	30	180.75	36.80	19.15
	60	240.75	27.92	10.27
	90	330.75	24.03	6.38
	120	450.75	21.87	4.22
	150	600.75	20.55	2.90
	180	780.75	19.60	1.95
	210	990.75	18.86	1.21
	240	1230.75	18.26	0.61
270	1500.75	17.76	0.11	

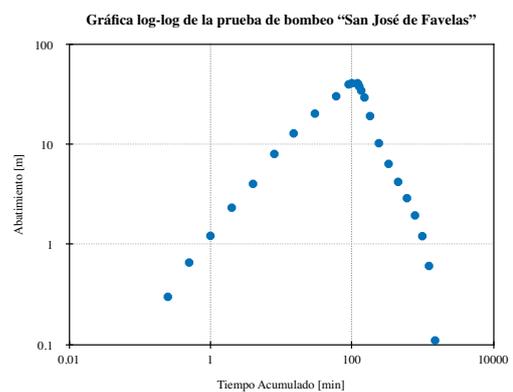
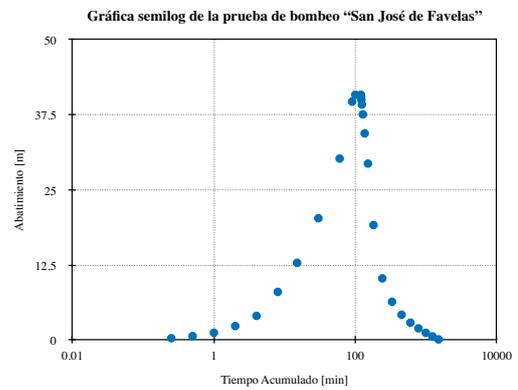


Fig. 4.8 Prueba de bombeo del pozo San José de Favelas (SANX, 2010) y sus relaciones tiempo-abatimiento.

El separar la prueba en abatimiento y recuperación permitió conocer a detalle el comportamiento del ensayo a lo largo del tiempo, además de identificar los regímenes de flujo presentes en el área del pozo a partir del comportamiento de la derivada, los cuales pueden diferenciarse en la Fig. 4.9.

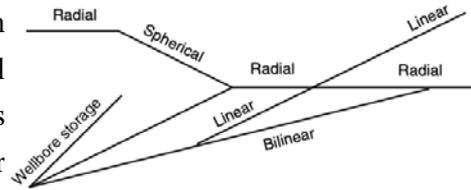
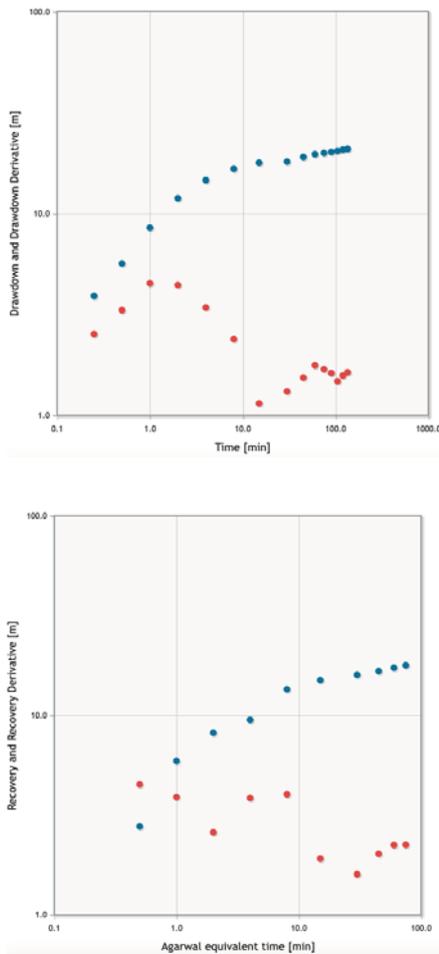


Fig. 4.9 Herramienta esquemática de identificación del régimen de flujo que representa la derivada logarítmica del abatimiento en función del tiempo logarítmico (Renard et al., 2009).

Para la reducción de ruido y el adecuado análisis de las derivadas se utilizó un suavizado de 0.4 de acuerdo al algoritmo de Bourdet et al. (1989), haciendo uso de la herramienta Aquidplot (Hernández-Espriú et al., 2018) en los pozos Tepehuanes pozo 1 y El Tambor. Además, en la etapa de recuperación se tomó el tiempo equivalente de Agarwal (1890), donde se asume que el tiempo total de bombeo es mayor al tiempo desde que el bombeo se detiene y la velocidad de este permanece constante, los valores obtenidos se encuentran en la Tabla 4.2.



#### TEPEHUANES POZO 1

##### Abatimiento

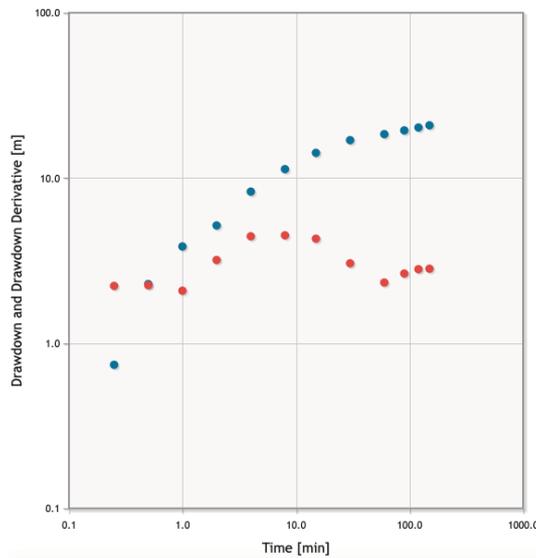
Cooper & Jacob (1946)		Renard et al. (2009)	
K [m/d]	0.67	K [m/d]	0.731
S	>1	S	>1
T [m <sup>2</sup> /d]	48.99	T [m <sup>2</sup> /d]	53.37

##### Recuperación

Cooper & Jacob (1946)		Renard et al. (2009)	
K [m/d]	0.56	K [m/d]	0.93
S	>1	S	>1
T [m <sup>2</sup> /d]	41.54	T [m <sup>2</sup> /d]	68.12

Fig. 4.10 Gráficos de relación tiempo-abatimiento (azul) con sus correspondientes derivadas (rojo) y resultados de acuerdo a los modelos de Cooper & Jacob (1946) y Renard et al. (2009), utilizando Aquidplot (Hernández-Espriú et al., 2018) para la prueba de bombeo Tepehuanes pozo 1.

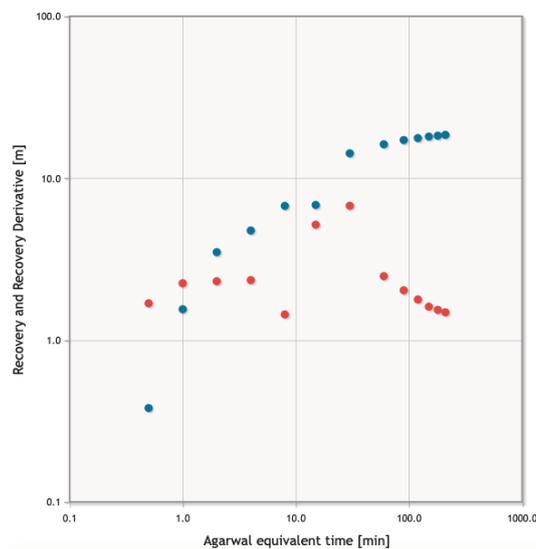
En la Fig. 4.10 se presentan los gráficos y resultados de la prueba de bombeo Tepehuanes pozo 1, este ensayo expone 3 tipos de flujo: lineal, radial y esférico; el primero refleja una posible corriente en fracturas, el radial un lapso de estabilidad y de abatimiento constante, y el último, recalca que se trata de un pozo parcialmente penetrante. De igual manera el comportamiento general de la curva sugiere un efecto de doble porosidad en acuíferos libres y, en los últimos tiempos de la etapa de abatimiento, es representado de manera sutil un límite de no flujo, que de acuerdo con la geología del sitio podría tratarse de rocas ignimbríticas. Mientras que en la etapa de recuperación, la derivada presenta mucho ruido, lo que la hace poco resolutive.



### EL TAMBOR

#### Abatimiento

Cooper & Jacob (1946)		Renard et al. (2009)	
K [m/d]	0.04	K [m/d]	0.04
S	>1	S	>1
T [m <sup>2</sup> /d]	4.59	T [m <sup>2</sup> /d]	4.45



#### Recuperación

Cooper & Jacob (1946)		Renard et al. (2009)	
K [m/d]	0.09	K [m/d]	0.09
S	>1	S	>1
T [m <sup>2</sup> /d]	8.92	T [m <sup>2</sup> /d]	9.17

Fig. 4.11 Gráficos de relación tiempo-abatimiento (azul) con sus correspondientes derivadas (rojo) y resultados de acuerdo a los modelos de Cooper & Jacob (1946) y Renard et al. (2009), utilizando AquidPlot (Hernández-Espriú et al., 2018) para la prueba de bombeo El Tambor.

En el caso de la prueba de bombeo El Tambor (Fig. 4.11) su comportamiento general refleja una doble porosidad y durante su abatimiento presenta flujo radial, lineal y esférico, esto muestra una etapa de estabilidad y disminución de nivel constante, mientras que el lineal indica un flujo en fracturas y el esférico confirma la parcialidad de penetración del pozo. En la recuperación su derivada es muy ruidosa, por lo tanto no puede interpretarse de manera acertada.

La prueba de bombeo San José de Favelas, representada en la Fig. 4.12 esta controlada por el almacenamiento de pozo, donde el comportamiento de la presión está dominada por el volumen y compresibilidad del fluido en el pozo, además del *skin effect* el cual está definido por [Everdingen \(1953\)](#) como un impedimento para el flujo causado por una región dañada infinitesimalmente delgada al rededor del pozo.

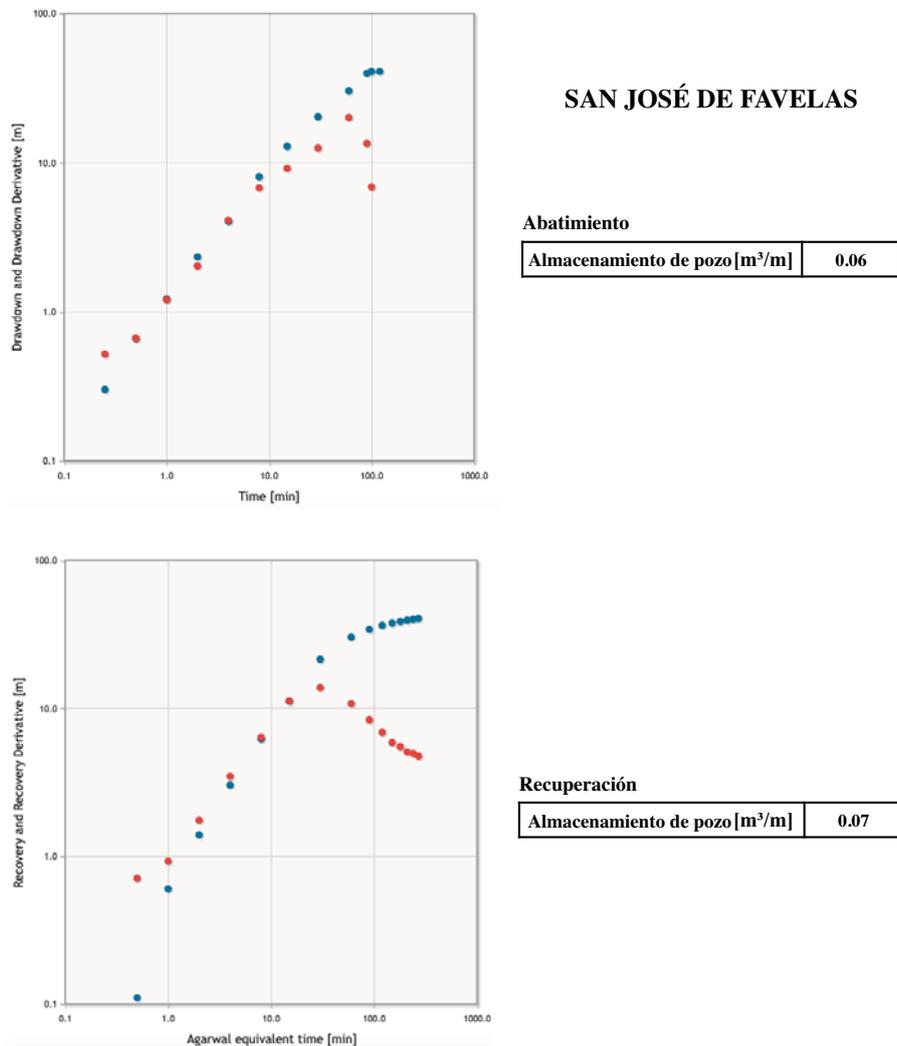


Fig. 4.12 Gráficos de relación tiempo-abatimiento (azul) con sus correspondientes derivadas (rojo) y resultados de acuerdo a los modelos de Cooper & Jacob (1946) y Renard et al. (2009), utilizando AquiDplot (Hernández-Espriú et al., 2018) para la prueba de bombeo San José de Favelas.

POZO	P. T. [m]	P.N.E. [m]	P.N.D. [m]	ABAT. TOTAL [m]	Q [l/s]	AquiDplot																		
						ABATIMIENTO									RECUPERACIÓN									
						Cooper & Jacob (1946)				Renard et al. (2009)					Alm. de pozo [m³/m]	Cooper & Jacob (1946)			Renard et al. (2009)					Alm. de pozo [m³/m]
						T	K	S	T	K	S	T	K	S		T	K	S						
[m²/d]	[m²/s]	[m/d]	[m²/d]	[m²/s]	[m/d]	[m²/d]	[m²/s]	[m/d]	[m²/d]	[m²/s]	[m/d]	[m²/d]	[m²/s]	[m/d]	[m²/d]	[m²/s]	[m/d]							
TEPEHUANES POZO 1 (CNA-1006-161)	80	7	28.06	20.9	35	48.99	6E-04	0.67	5.25	53.37	6E+04	0.73	5.25	S/D	41.54	5E-04	0.56	19.54	68.12	8E-04	0.93	19.54	S/D	
EL TAMBOR (CNA-1006-050)	100	4.95	25.79	20.84	3	4.59	5E-05	0.04	3.14	4.45	5E-05	0.04	3.14	S/D	8.92	1E-04	0.09	4.67	9.17	1E-04	0.09	4.67	S/D	
SAN JOSÉ DE FAVELAS (CNA-1006-012)	100	17.65	58.48	40.83	1	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	0.06	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	0.07

Tabla. 4.2 Resultados e interpretaciones obtenidas por el autor con AquiDplot (Hernández-Espriú et al., 2018), de las pruebas de bombeo realizadas por SANX Ingeniería Integral y desarrollo S.A. de C.V. en el año 2010. De la cual P.T.: Profundidad total, P.N.E.: Profundidad al nivel estático, P.N.D.: Profundidad al nivel dinámico, ABAT. TOTAL: Abatimiento total. O: Caudal de extracción. T: Transmisividad, K: Conductividad hidráulica v S: Coeficiente de almacenamiento.

Con el fin de comparar y contrastar resultados, se realizaron interpretaciones empleando el método de Cooper- Jacob (Cooper Jr & Jacob, 1946) y Moench (Moench, 1985) en el pozo San José de favelas, Neuman (Neuman, 1974) para acuífero libre en el pozo Tepehuanes pozo 1 y Moench (Moench, 1985) de acuíferos fracturados para El Tambor; lo anterior con el software AQTESOLV (Glenn M., 2007). En el uso de esta herramienta primeramente se analizó la etapa de abatimiento, lo cuál puede mostrarse de la Fig. 4.13 a la Fig. 4.15, y posterior esto se realizó la interpretación del abatimiento y la recuperación en conjunto, gráficos observables de la Fig. 4.16 a la Fig. 4.18.

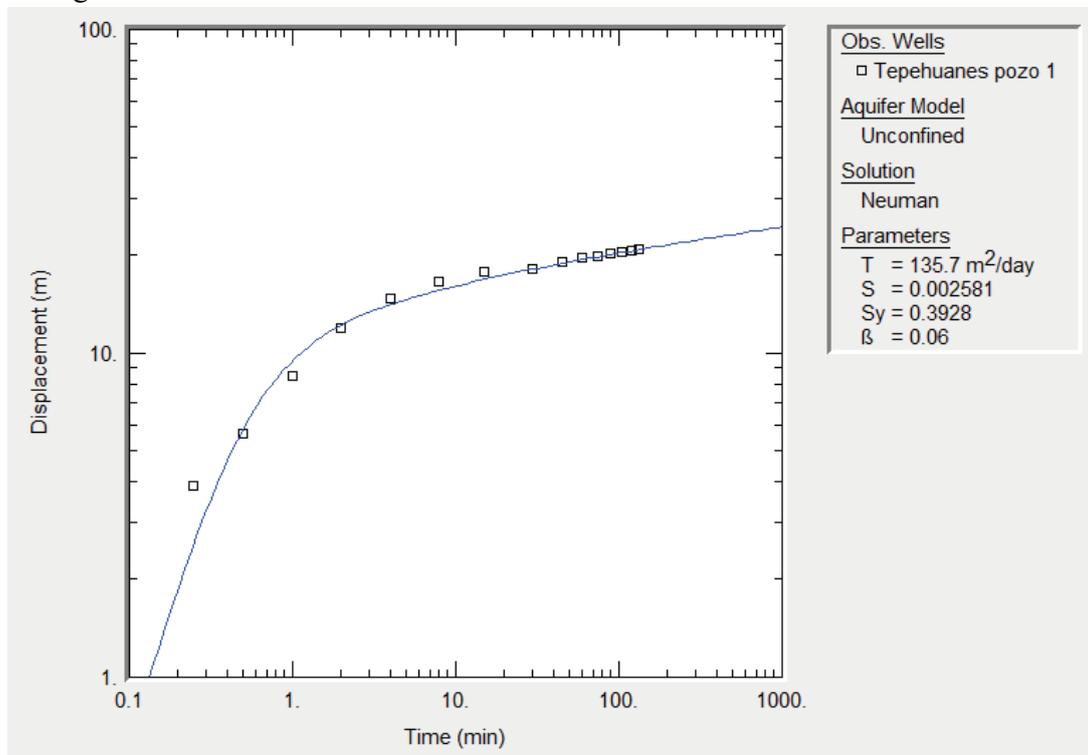


Fig. 4.13 Resultados e interpretación obtenidos por el autor con AQTESOLV (Glenn M., 2007), de la prueba de bombeo Tepehuanes pozo 1, en su etapa de abatimiento.

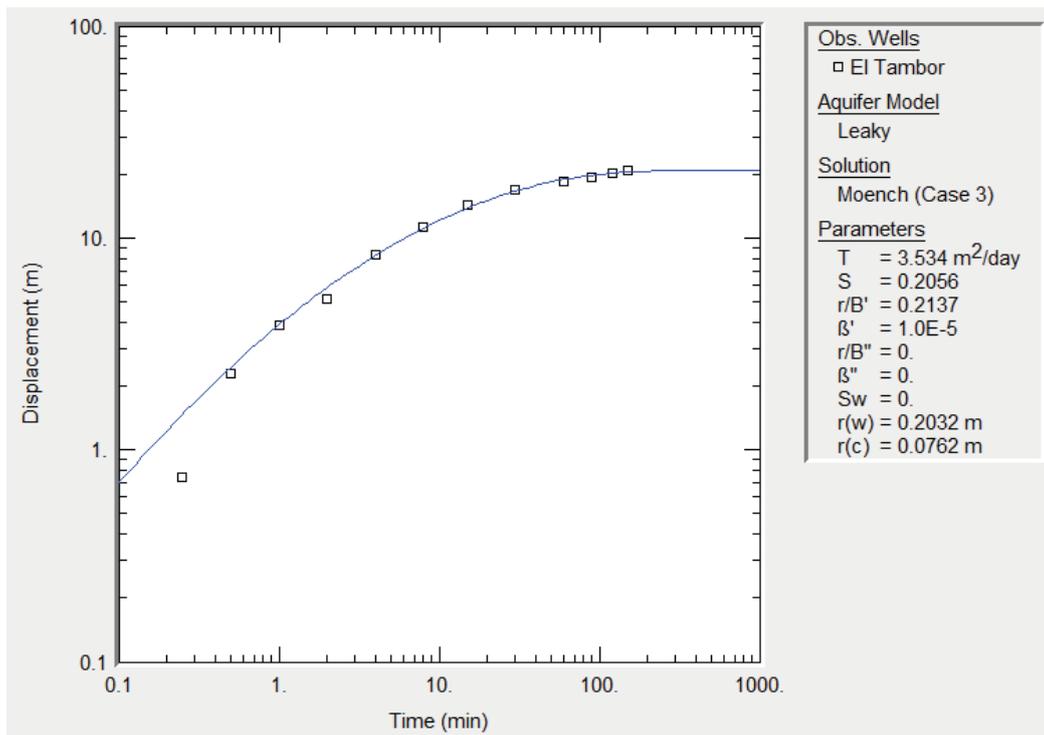


Fig. 4.14 Resultados e interpretación obtenidos por el autor con AQTESOLV (Glenn M., 2007), de la prueba de bombeo El Tambor, en su etapa de abatimiento.

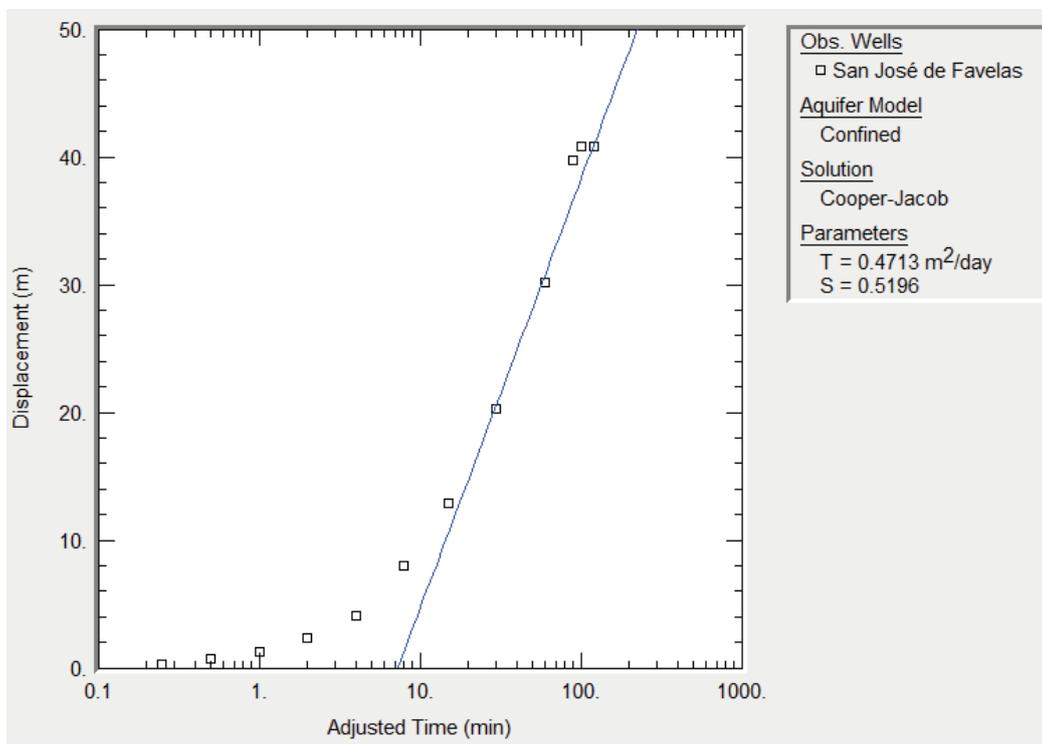


Fig. 4.15 Resultados e interpretación obtenidos por el autor con AQTESOLV (Glenn M., 2007), de la prueba de bombeo San José de Favelas, en su etapa de abatimiento.

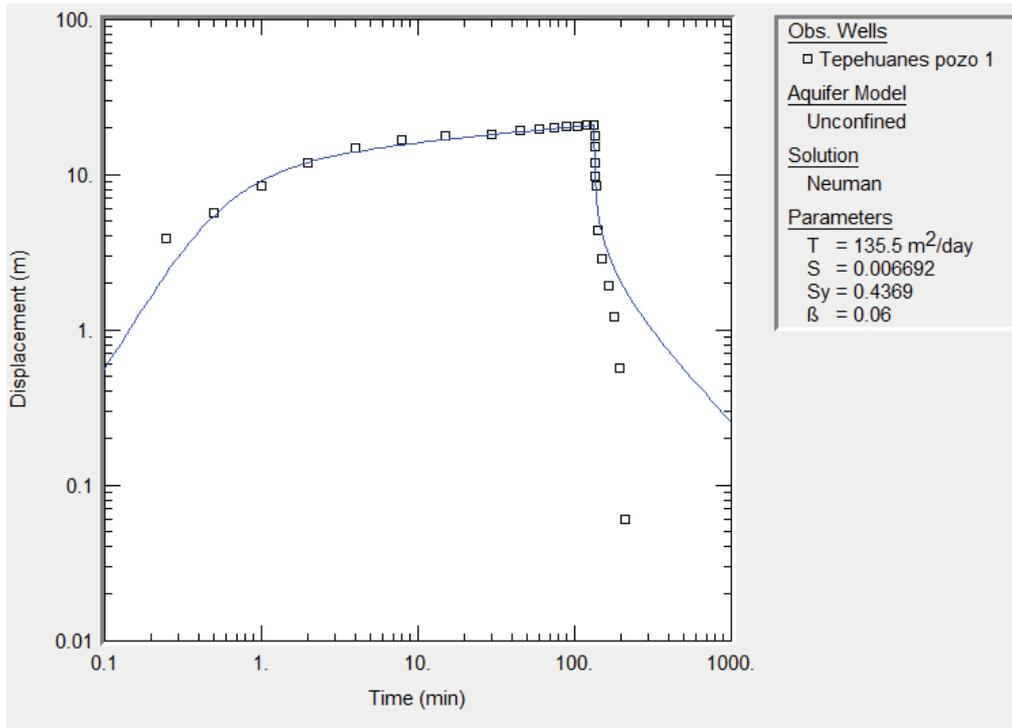


Fig. 4.16 Resultados e interpretación obtenidos por el autor con AQTESOLV (Glenn M., 2007), de la prueba de bombeo Tepehuanes pozo 1.

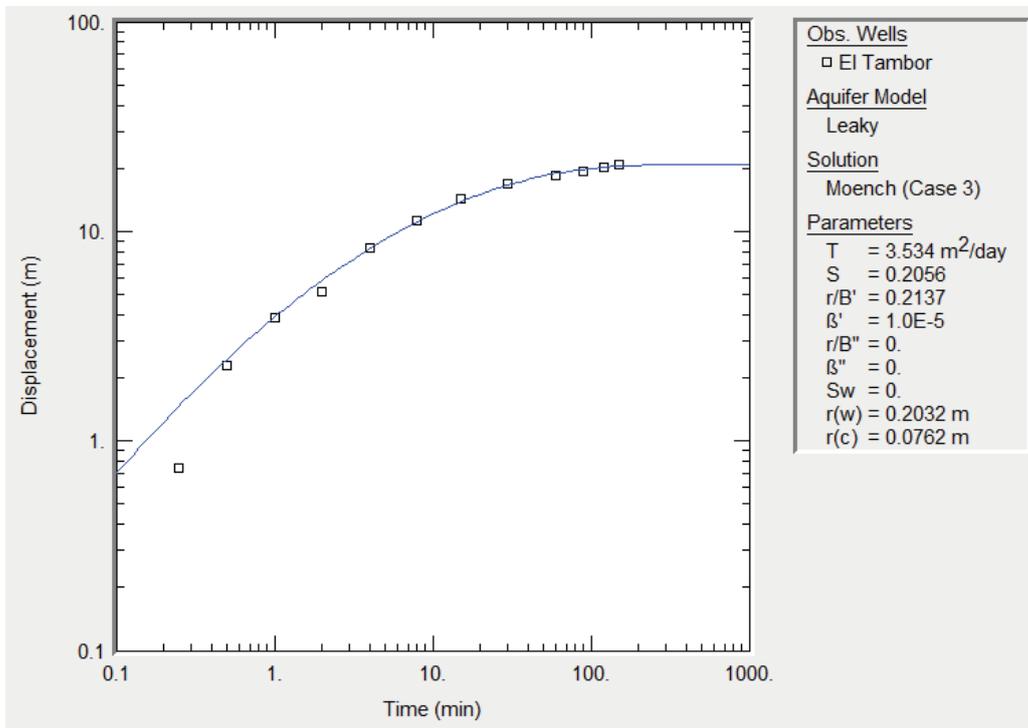


Fig. 4.17 Resultados e interpretación obtenidos por el autor con AQTESOLV (Glenn M., 2007), de la prueba de bombeo El Tambor.

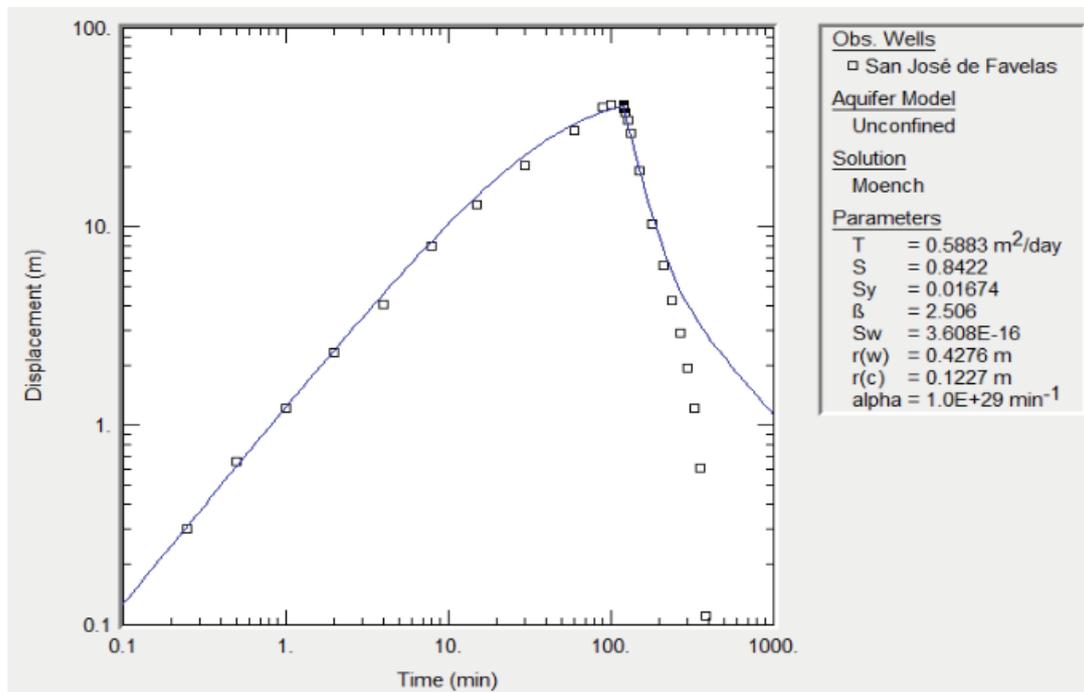


Fig. 4.18 Resultados e interpretación obtenidos por el autor con AQTESOLV (Glenn M., 2007), de la prueba de bombeo San José de Favelas.

Ninguna prueba de bombeo contó con pozo de observación, debido a que esto influye en el valor del coeficiente de almacenamiento (S), los valores obtenidos son aproximados; estos, de manera general son bajos, debido a las litologías consolidadas, granulometría fina y zonas masivas. Lo anterior se confirma con el caudal específico de cada pozo, para la prueba Tepehuans pozo 1 el valor estimado es de 1.25 [l/s/m], para El Tambor 0.14 [l/s/m] y para el ensayo San José de Favelas un dato de 0.024 [l/s/m].

En la Tabla 4.3 se exponen los resultados de las interpretaciones realizadas por medio del software AQTESOLV (Glenn M., 2007). Cabe destacar que las diferencias entre los resultados obtenidos por medio de este y Aqidiplot (Hernández-Espriú et al., 2018) son notorias, estas pueden deberse a que la primer herramienta solo toma una fracción de la prueba para interpretar; mientras que en el segundo se analiza toda la parte en el caso del abatimiento o la prueba completa, con ajuste a un modelo analítico.

POZO	MÉTODO	P.T. [m]	P.N.E. [m]	P.N.D. [m]	ABAT. TOTAL [m]	Q [l/s]	BOMBEO			BOMBEO Y RECUPERACIÓN		
							T [m <sup>2</sup> /d]	T [m <sup>2</sup> /s]	S	T [m <sup>2</sup> /d]	T [m <sup>2</sup> /s]	S
TEPEHUANES POZO 1 (CNA-1006-161)	Neuman	80	7	28.06	20.9	35	135.70	1.57E-03	0.0025	135.50	1.56E-03	0.0066
EL TAMBOR (CNA-1006-050)	Moench (caso 3)	100	4.95	25.79	20.84	3	3.53	4.08E-05	0.2056	3.36	3.88E-05	1.67
SAN JOSÉ DE FAVELAS (CNA-1006-012)	Cooper & Jacob, Theis.	100	17.65	58.48	40.83	1	0.47	5.43E-06	0.5196	0.66	7.63E-06	0.5276

Tabla. 4.3 Resultados e interpretaciones obtenidas por la autora con AQTESOLV (Glenn, 1989), de las pruebas de bombeo realizadas por SANX Ingeniería Integral y desarrollo S.A. de C.V. en el año 2010.

De la cual P.T: Profundidad total, P.N.E.: Profundidad al nivel estático, P.N.D.: Profundidad al nivel dinámico, ABAT. TOTAL: Abatimiento total, Q: Caudal de extracción, T: Transmisividad y S: Coeficiente de almacenamiento.

La Tabla 4.4 presenta la recapitulación de información y rangos de resultados obtenidos para cada uno de los pozos de las pruebas de bombeo reinterpretadas por la autora.

POZO	P.T. [m]	P.N.E. [m]	P.N.D. [m]	ABATIMIENTO TOTAL [m]	Q [l/s]	ABATIMIENTO				RECUPERACIÓN			
						T [m <sup>2</sup> /d]	K [m/d]	S	Alm. de pozo	T [m <sup>2</sup> /d]	K [m/d]	S	Alm. de pozo
TEPEHUANES POZO 1 (CNA-1006-161)	80	7	28.06	20.9	35	48.99 - 135.7	0.67 - 0.73	S/D	0.06	41.5 - 135.5	0.56 - 0.93	0.0066 - 19.54	0.06
EL TAMBOR (CNA-1006-050)	100	4.95	25.79	20.84	3	3.53 - 4.59	0.04	0.20 - 3.14	S/D	3.36 - 9.17	0.09	1.67 - 4.67	S/D
SAN JOSÉ DE FAVELAS (CNA-1006-012)	100	17.65	58.48	40.83	1	0.47	S/D	0.51	0.06	0.66	S/D	0.52	0.07

Tabla. 4.4 Rangos y resultados obtenidos por la autora de las pruebas de bombeo realizadas por SANX Ingeniería Integral y desarrollo S.A. de C.V. en el año 2010.

De la cual P.T: Profundidad total, P.N.E.: Profundidad al nivel estático, P.N.D.: Profundidad al nivel dinámico, Q: Caudal de extracción, T: Transmisividad, S: Coeficiente de almacenamiento y Ali. de pozo: Almacenamiento de pozo.

### **4.3 Parámetros fisicoquímicos del agua**

Durante el trabajo de campo llevado a cabo del 25 al 30 de Julio de 2019 se realizaron mediciones de parámetros fisicoquímicos del agua, tales fueron la temperatura, conductividad eléctrica, pH, sólidos disueltos totales y potencial de oxidación- reducción. En la sección de apéndices, en la Tabla 7.2 se muestran los valores fisicoquímicos medidos para cada uno de los aprovechamientos analizados.

Los resultados de estas mediciones se presentan a continuación, para ello es importante señalar que para las muestras analizadas no se cuenta con un valor de profundidad en específico, por lo que no representan una unidad hidrogeológica en especial, sino una posible mezcla.

#### **4.3.1 Temperatura**

Se obtuvo el valor de temperatura del agua en un total de 25 aprovechamientos distribuidos a lo largo del semigraben de Santiago Papasquiario, de los cuales 9 corresponden a pozos, 5 norias y 11 manantiales. Se consideran temperaturas termales aquellas que son mayores o iguales a 30[°C], mientras que las menores a este valor se toman como temperaturas a temperatura ambiente.

En la Fig. 4.19 se observa que el carácter termal del agua subterránea se distribuye tanto en el norte como en el centro y sur del semigraben. Cabe destacar que las temperaturas más altas se localizan al norte del área de estudio, en el M03 cuya ubicación es cercana a la localidad Sandías y el M07 a Los Herrera, con temperaturas medidas de 68[°C] y 74.5[°C] respectivamente. Mientras que la temperatura máxima en el centro, el M10m cercano a Santiago Papasquiario es de 43[°C] y en el sur el M08, próximo a Los Ojitos es de 39[°C].

El agua subterránea fría se dispone en la parte norte del semigraben, hacia el noroeste, sur y en la localidad de Los Herrera, con los datos más bajos representados por el M06 y el P087, N108 y N107 respectivamente, con temperaturas medidas que rondan los 20[°C]; en el centro de la zona de estudio, en Santiago Papasquiario señalado por el P094 y al noroeste de Favelas con el P006, y en la parte sur, con la N111 ubicado al noreste de Los Ojitos; estos tres con temperaturas de 24[°C].

Es importante señalar que existen puntos donde el agua termal y con temperaturas normales se encuentran a menos de 5 km de distancia como sucede en Los Herrera y Santiago Papasquiario, se podría pensar en 2 unidades hidroestratigráficas, una en la litología granular y otra en ignimbritas, este último rectificado en el manantial M07, donde se reportó la temperatura más alta de la zona de estudio.

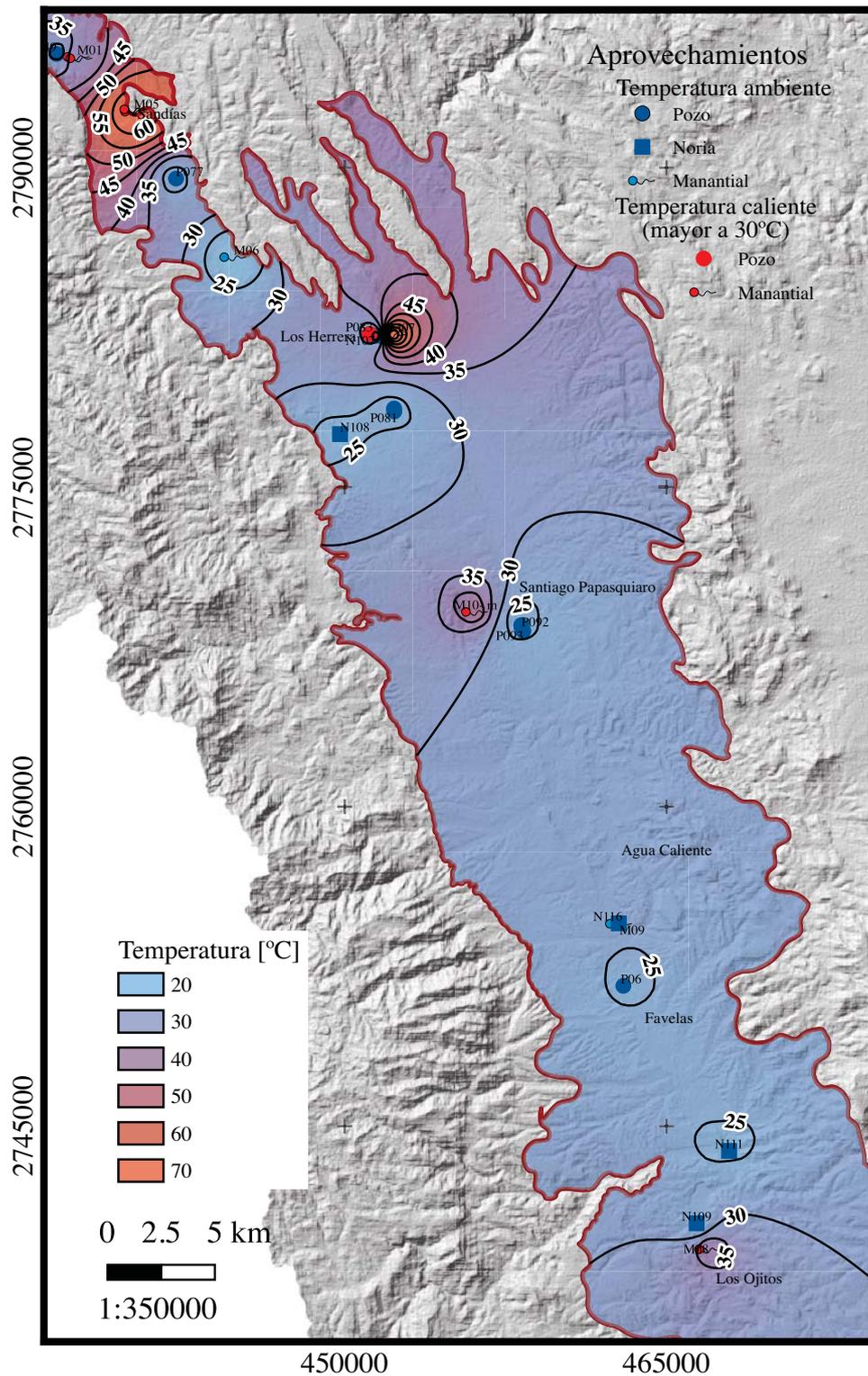


Fig. 4.19 Mapa de distribución de la temperatura del agua subterránea en el semigraben de Santiago Papasquiario en el año 2019, así como los diferentes aprovechamientos en los que se realizaron las mediciones.

### 4.3.2 Conductividad eléctrica

Para este parámetro se analizaron 22 aprovechamientos de los cuales 9 corresponden a pozos, 5 norias y 8 manantiales. Es importante considerar que el agua del acuífero del semigraben de Santiago Papasquiario, cuyo valor máximo de sólidos disueltos es de 534 [ppm], es considerada como dulce, esto de acuerdo a la clasificación de Freeze & Cherry (1979); en este tipo de agua se considera el rango de valores de conductividad eléctrica de 100 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] a 200 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ].

A partir del muestreo se obtuvieron datos de 181 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] a 1,067 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ], con un valor promedio de 431.5 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]; para fines del presente trabajo se considera baja conductividad eléctrica a los valores menores al promedio y alta a aquellos mayores a este.

En la Fig. 4.20 está visualizada la distribución de la conductividad eléctrica en el semigraben de Santiago Papasquiario. Los valores bajos, que representan una mejor calidad química del agua subterránea se distribuyen en el extremo norte del área de estudio, a los alrededores de la localidad de Sandías, con el punto más bajo en M01 con 181 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ], en la parte central en Santiago Papasquiario el P093 con 326 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] y en el sur, desde Favelas hasta Los Ojitos en la N111, con un dato de 189 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]. Mientras que, los más altos, simbolizados en la parte central, el M10m cercano a Santiago Papasquiario y el M07 próximo a Los Herrera, llegan a 1,067 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] y 1,019 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] respectivamente.

Es importante señalar que de acuerdo a la representación de los valores medidos, en los extremos del semigraben, tanto al norte como sur la conductividad eléctrica es baja, menor a 400 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] y va en aumento hacia el centro del mismo. De igual forma al observar la figura existe una relación entre la temperatura y la conductividad eléctrica, las mayores temperaturas representan valores altos de conductividad, en este caso temperaturas mayores a 40[ $^{\circ}\text{C}$ ] en la zona de Santiago Papasquiario y al norte de este reportan valores superiores a 1000 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ], esta relación entre los dos parámetros no se cumple totalmente, ya que al norte y al sur del semigraben existen temperaturas máximas de 68[ $^{\circ}\text{C}$ ] y 39[ $^{\circ}\text{C}$ ] respectivamente pero la conductividad medida es menor a 500 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] en el norte y por debajo de 300 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] en el sur. Y al realizar un método de correlación lineal este indica un valor de 0.27, lo que señala la prácticamente nula relación entre uno y otro de manera numérica, como se presenta en la Fig. 4.21. Lo anterior podría representar un cambio químico debido al transporte y combinación del agua subterránea.

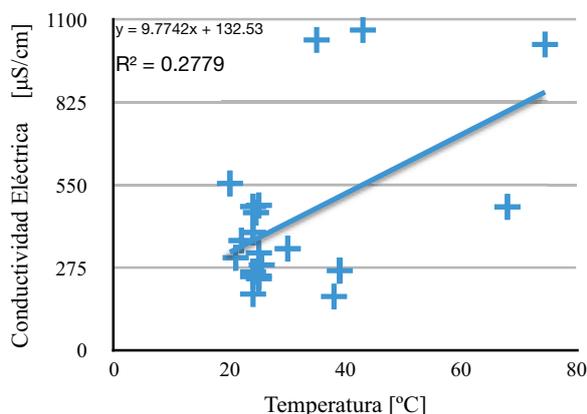


Fig. 4.21. Gráfico de relación Temperatura y Conductividad Eléctrica de acuerdo a los datos medidos en campo, 2019.

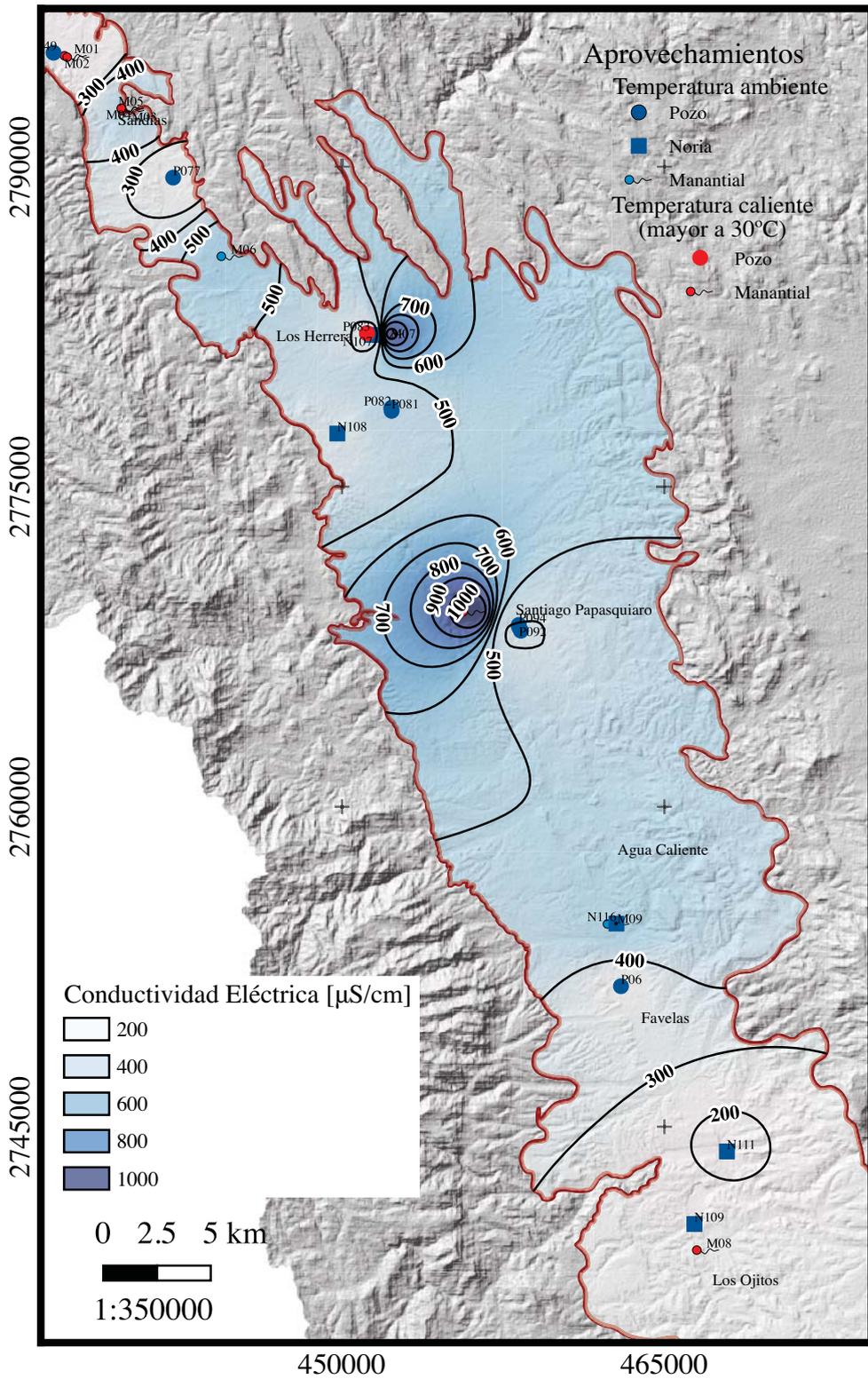


Fig. 4.20 Mapa de distribución del comportamiento de la conductividad eléctrica del agua subterránea en el semigraben de Santiago Papasquiari en el año 2019, así como los diferentes aprovechamientos en los que se realizaron las mediciones.

### 4.3.3 Sólidos disueltos totales

Se analizaron muestras de 22 aprovechamientos de los cuales 9 corresponden a pozos, 5 norias y 8 manantiales en las que la concentración se midió en partes por millón, dichos resultados de distribución de sólidos disueltos totales se representan en la Fig. 4.22 .

La NOM-127-SSA1-1994 establece que el límite permisible de sólidos disueltos totales en el agua para uso y consumo humano es de 1000 [mg/l], en este trabajo el valor máximo medido en el área del semigraben es de 534 [ppm] (mg/l); debido a que este está por debajo del límite establecido se considerará alto en concentración a los valores mayores al promedio, es decir 215.8 [mg/l], y bajo a los datos que estén por debajo de esta cifra.

Como se aprecia en la Fig. 4.22 la alta concentración de sólidos disueltos totales se encuentra al norte y centro del área de estudio, cerca de las localidades de Los Herrera con el M07 y Santiago Papasquiari representado por el M10m, con datos de 510 [ppm] y 534 [ppm] respectivamente. Estos dos puntos coinciden también con altas temperaturas y altos valores de conductividad eléctrica.

Mientras que las mediciones bajas de concentración de sólidos se localizan en el extremo norte del semigraben, en el centro, a los alrededores de Santiago Papasquiari y al sur desde Favelas hasta Los Ojitos, de los cuales el menor, simbolizado por el M01 con 91 [ppm] se localiza al noroeste de Sandías y la N111 en la localidad de Los Ojitos con un dato de 94 [ppm].

El comportamiento del total de sólidos disueltos es muy similar al de conductividad eléctrica, hacia los extremos norte y sur se muestran los datos más bajos que van desde menos de 100 [ppm] hasta 200 [ppm], mientras que las concentraciones más altas se agrupan al centro del semigraben, con valores desde las 300 [ppm] hasta alcanzar datos superiores a 500 [ppm]. De acuerdo a lo previamente analizado, existe cierta tendencia en la cual las temperaturas termales tienen mayor conductividad eléctrica y concentración de sólidos disueltos totales en comparación a los que su temperatura es menor a los 30[°C]; aunque como se mencionó previamente, esta relación no se aplica para todos y cada uno de los aprovechamientos analizados.

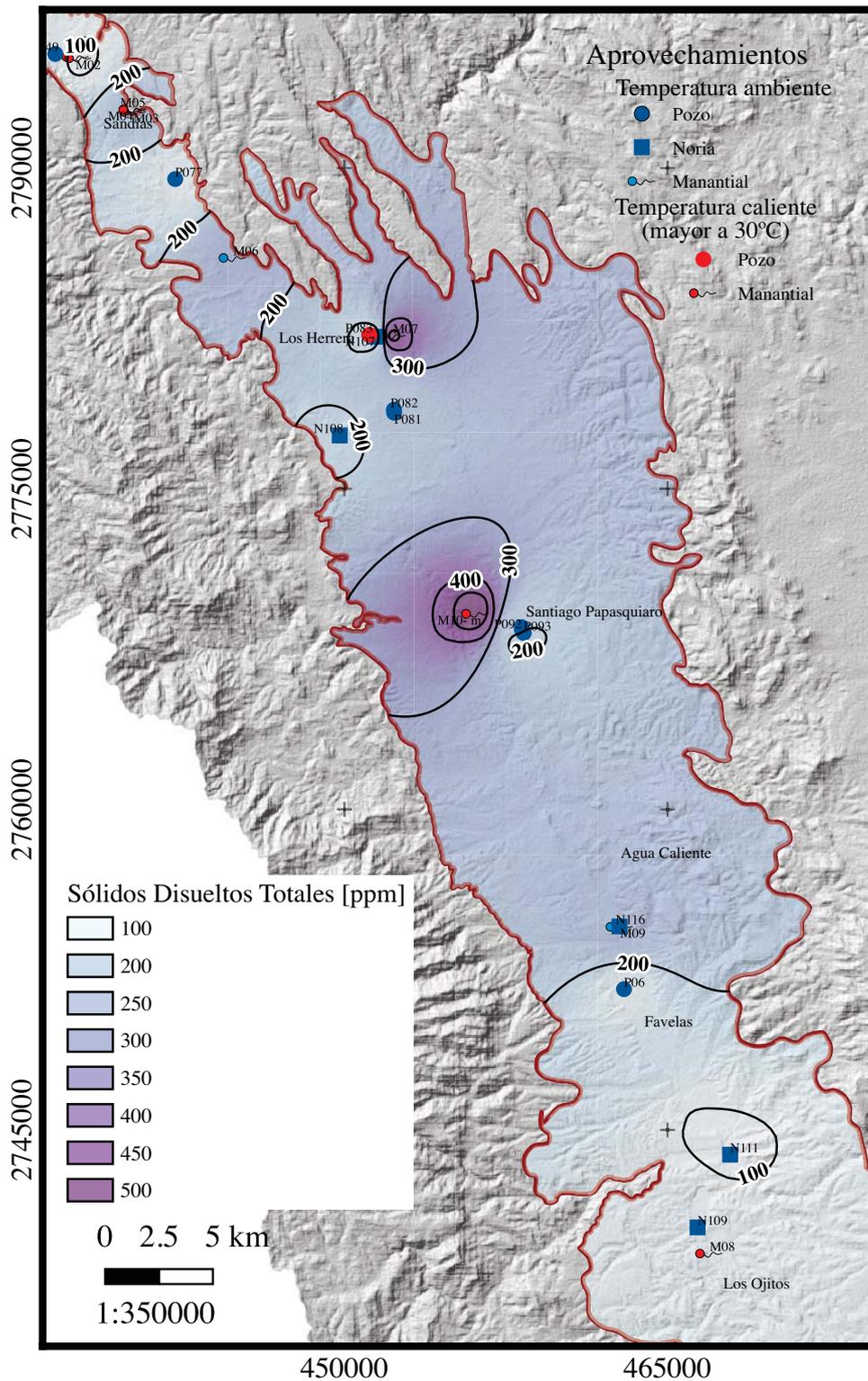


Fig. 4.22 Mapa de distribución de sólidos disueltos totales del agua subterránea en el semigraben de Santiago Papasquiari en el año 2019, así como los diferentes aprovechamientos en los que se realizaron las mediciones.

#### 4.3.4 Potencial de hidrógeno

Al igual que en el caso de la conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, en el análisis del potencial de hidrógeno o mejor conocido como pH se tomaron muestras de agua subterránea de 22 aprovechamientos de los cuales 9 corresponden a pozos, 5 norias y 8 manantiales, la distribución de resultados puede apreciarse en la Fig. 4.23.

La NOM-127-SSA1-1994 establece que el límite permisible de potencial de hidrógeno para aguas con fines de uso y consumo humano es de 6.5-8.5, el dato más alto obtenido en el área de estudio fue de 8.74 en el P092. Debido a que la diferencia entre este valor y el margen es pequeña, el agua se puede someter a un tratamiento de neutralización para ser utilizada para tales fines, una forma de realizarlo es por medio del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en forma de ácido carbónico, este es un sustituto potencial de ácidos inorgánicos como el ácido sulfúrico y clorhídrico. En cuanto al valor más bajo de las muestras, este se encuentra en la N111 con 6.57 de pH, lo cual indica que el agua subterránea del área del semigraben no es más ácida que el límite establecido por la norma.

La distribución de los valores más altos se extiende en la parte norte y centro-sur del área de estudio, el primero está localizado al sur de la localidad de Sandías, el P077 con un dato de 8.43; mientras que en la zona centro-sur, donde los datos son mayores a 8, desde Santiago Papasquiario hasta Favelas, su punto con mayor medida de pH fue el P092 con 8.74. Los valores menores se ubican al norte, centro y sur del semigraben, estos con un rango que va de 7 a 6.5 de acuerdo a la figura representada, el punto con el menor pH al norte, localizado cerca de la localidad de Los Herrera es el M07 con 6.75, en el centro, en Santiago Papasquiario el M10 con un valor de 6.74 y en el sur, el punto N111 ubicado al noreste de Los ojitos con 6.57.

De manera general el pH que más persiste en el área del semigraben es un rango de 7 a 8, lo que permanece dentro del margen establecido por la norma antes mencionada.

Cabe destacar que aunque los aprovechamientos termales tienen un pH mayor a 7, con excepción del M07 cuyo dato es de 6.75, no es posible señalar una relación entre temperatura y potencial de oxígeno, ya que aunque estos tengan mayor pH, los aprovechamientos con temperatura normal varían en esta medida, por lo que no se puede establecer un rango de valores para estos.

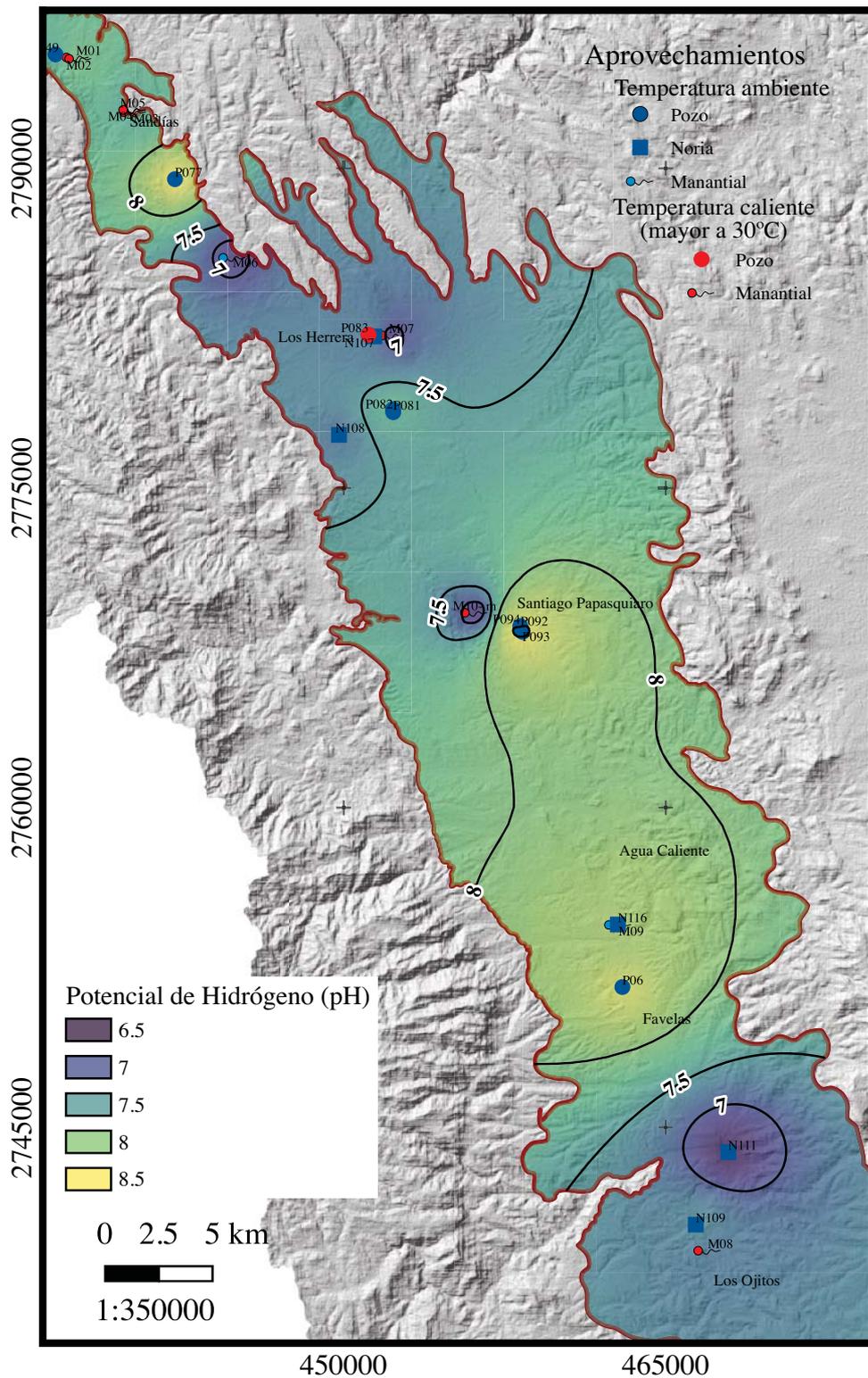


Fig. 4.23 Mapa de distribución del potencial de hidrógeno del agua subterránea en el semigraben de Santiago Papasquiario en el año 2019, así como los diferentes aprovechamientos en los que se realizaron las mediciones.

### 4.3.5 Potencial de Oxidación- Reducción (Eh)

Para este parámetro se realizó el análisis de muestras de agua subterránea de 22 aprovechamientos de los cuales 9 corresponden a pozos, 5 norias y 8 manantiales. De acuerdo con Clark (2015), los valores de Eh para el agua natural varían entre -0.5 [V] y 1 [V]; debido a que los datos obtenidos se encuentran dentro de este rango, se consideran altos aquellos que estén por encima de 0.14 [V] el cuál es el valor promedio y bajos a aquellos que sean menores a esta cifra. Es importante señalar que el potencial redox mide la actividad de los electrones, por lo que el agua con potencial negativo tenderá a actuar como reductor y si este es elevado se comportará como oxidante.

La Fig. 4.24 muestra la distribución de los valores de potencial de oxidación-reducción para el área del semigraben de Santiago Papasquiario. Los valores bajos se encuentran en el norte y centro del área de estudio, con el dato más bajo en el P077 ubicado al sureste de la localidad de Sandías, cuya medición de potencial es de -0.21[V]. Mientras que los altos valores se observan al sur del área de estudio, desde Santiago Papasquiario hasta Los Ojitos, con el punto máximo en el N116 al noreste de Favelas con 0.43 [V] de Eh.

De manera general el potencial redox aumenta de norte a sur del semigraben y una gran extensión tiene un rango de 0.1 [V] a 0.3 [V]; además, coincide que, los aprovechamientos termales tienen un valor medido por debajo de 0.1 [V] a excepción del M08, el cuál tiene un dato de 0.18 [V] y del P077, que aunque su temperatura es de 25[°C] su potencial es el mayor en el área de estudio.

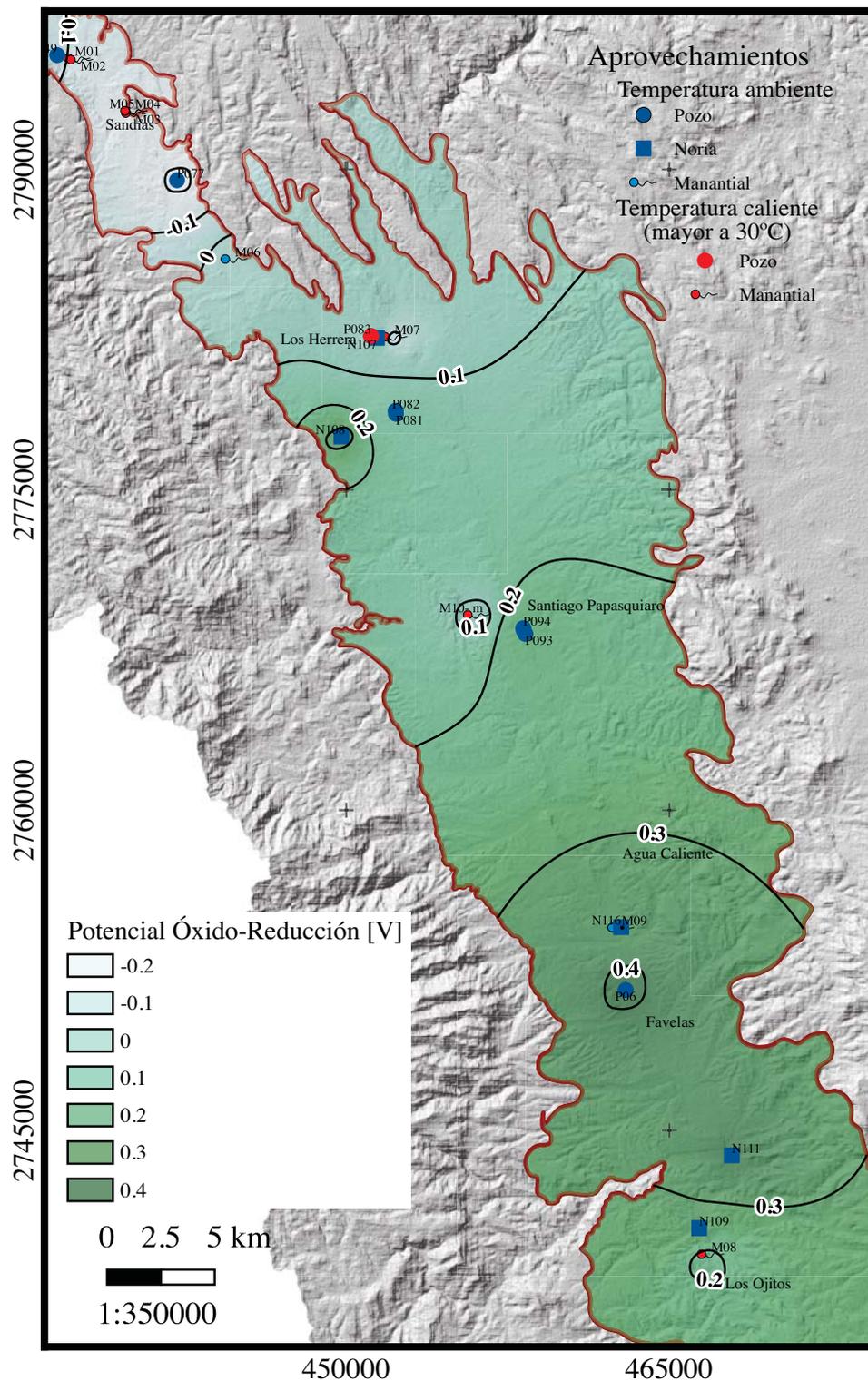


Fig. 4.24 Mapa de distribución del potencial de oxidación- reducción del agua subterránea en el semigraben de Santiago Papasquiare en el año 2019, así como los diferentes aprovechamientos en los que se realizaron las mediciones.

## 5. Conclusiones

Dentro del semigraben de Santiago Papasquiario se encuentra una actividad geotérmica dominada por conducción, en la unidad de ignimbritas fracturadas emplazadas durante el Oligoceno, estas contienen cantidades significativas de U, Th y K, que al ocurrir su decaimiento radioactivo liberan tal energía que aumenta la temperatura del agua subterránea contenida en el medio.

El acuífero Tepehuano- Santiago está conformado por dos unidades hidroestratigráficas principales: la ignimbrita fracturada que almacena fluidos termales, y una unidad granular caracterizada como Formación Santiago y sedimentos del Neógeno- Cuaternario de depósitos lacustres, conglomerados y arenas intercalada con basaltos equivalentes a la formación Metates, en la que está contenida agua con temperaturas menores a 30[°C], de manera específica entre 20[°C] y 25[°C] de acuerdo al manantial M06 y M09 respectivamente.

En este acuífero con características de ser libre en unas zonas y en otras fracturado, la recarga natural ocurre de dos formas, la primera por medio de la infiltración de agua de lluvia en las ignimbritas fracturadas, principalmente en los bordes del semigraben, y la segunda a través del sedimento granular, por medio de precipitaciones en la zona, así como infiltraciones a partir de los ríos formados.

La unidad ignimbrítica tiene dos comportamientos hidráulicos a lo largo del área de estudio, como una zona de recarga en los costados del semigraben, en las áreas al este de la localidad de Santiago Papasquiario, al noroeste de Sandías y con más abundancia en la SMO, donde se han localizado gran número de fracturas y fallas normales; mientras que el otro comportamiento de esta litología es de límite impermeable, presente en el área central del semigraben.

La presencia de fallas y fracturas en esta unidad facilita el ascenso y circulación de los fluidos termales hacia profundidades someras, algunas veces esta se mezcla con el agua procedente del medio granular como puede ejemplificarse hacia el centro del semigraben, señalado por sus composiciones fisicoquímicas de temperatura, conductividad y de sólidos disueltos totales con temperaturas que van de 26[°C] a 33[°C]. Mientras que en las zonas confinadas, principalmente en manantiales al norte del área de estudio, donde la litología es somera o aflora, el agua alcanza temperaturas de 74.5[°C]; la concentración de altas temperaturas en esta área del semigraben puede deberse a la abundancia de fallamiento en comparación con las zonas al sur del mismo.

El sistema geotérmico de esta región puede considerarse un recurso geotérmico de media-baja, debido a que sus temperaturas están por debajo de los 150[°C], por esto mismo, actualmente el vapor y presión no son suficientes para un aprovechamiento comercial convencional, su uso como puede verificarse al ir a estas zonas de manantiales, son con fines terapéuticos en tinas termales o para cocinar alimentos como sucede en el manantial más caliente .

Con un estudio hidrogeoquímico a detalle de sus aguas, principalmente de isótopos y la realización de un mayor número de pruebas de bombeo a lo largo del área de semigraben, será posible conocer a fondo el comportamiento del acuífero y con ello realizar una planeación adecuada para alcanzar la seguridad hídrica y posiblemente, con una tecnología innovadora utilizar el potencial geotérmico del sitio para beneficio comercial y doméstico.

## Referencias citadas

Agarwal, R.G. (1980). *A new method to account for producing time effects when drawdown type curves are used to analyze pressure buildup and another test data*. SPE Paper 9289, presented at the 55th SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas, Tx, United States of America. Sept 21-24.

Aguirre- Díaz, G. J. et al. (2008) *Chapter 4 The Ignimbrite Flare-Up and Graben Calderas of the Sierra Madre Occidental, Mexico*. Elsevier B.V. Developments in Volcanology, Vol 10. United States of America. p.p 143-190

Alencaster, G. & de Cserna, Z. (1961). *Paleontología del Triásico Superior de Sonora Parte 1, Estratigrafía del Triásico Superior de la parte central del Estado de Sonora*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología. Paleontología Mexicana, 11. p. 18

Anderson, T. H., Silver, L. T., 1979, The role of the Mojave-Sonora megashear in the tectonic evolution of northern Sonora, en Anderson, T. H., y Roldán-Quintana, J. (eds.), *Geology of northern Sonora: Guidebook-field trip No. 27*, Annual meeting of the Geological Society of America, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología and the University of Pittsburgh, Pittsburgh, p.p. 59-68.

Anderson, T. H. & Silver, L. T. (1979). *The role of the Mojave- Sonora megashear in the tectonic evolution of northern Sonora*. The Geological Society of America: Estación Noroeste, Universidad Nacional Autónoma de México and the University of Pittsburgh. Pittsburg United States of America. p.p 56-68

Bourdet, D. (2002). *Well test analysis: The use of advanced interpretation models*. Elsevier (Vol. 3).

Cameron, K. L., Nimz, G. J., Kuentz, D., Niemeyer, S. & Gunn, S. (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). p.p. 7817-7840

Castillo- Reynoso, J. C., *Trabajo de investigación. Cartografía y caracterización de unidades geológicas con datos obtenidos mediante analizador portátil RX, en el área de Santiago Papasquiaro*.

- CONAGUA, G. de A. S. (2018) *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Tepehuanes- Santiago (1006), Estado de Durango*. Sugerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos. p.p. 7-32
- Cooper Jr., H. H. & 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), p.p. 526-534.
- Fernández D. P. (2000) *Energía Geotérmica*. Universidad Cantabria. España. p.p. 3-12
- Ferrari, L., Valencia, M. M. y Bryan, S. (2005) *Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LVII, número 3. México. p.p.343-378
- Freeze, A. R., Cherry J. A. (1979). *Groundwater*. Ontario, Canadá: Prentice Hall.
- Glenn M, D. (2007). *AQTESOLV*. HydroSOLVE Inc, USA.
- González-León, C. M. (1997) *Sequence stratigraphy and paleogeographic setting of the Antimonio Formation (Late Permian-Early Jurassic), Sonora, Mexico*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 14. p.p. 136-148.
- Hantush, M. S. (1960). *Modification of the theory of leaky aquifers*. Journal of Geophysical Research. Wiley Online Library, 65(11), p.p. 3713-3725.
- Hernández-Espriú, A., Gómez-Espinosa, V., Cruz, A., Riestra, E., Pérez-Márquez, R. (2018). *"AquiDplot Suite: A Computer Tool for Aquifer Test Analysis Using Diagnostic Plots, Version 1.0"*. Hydrogeology Group, Faculty of Engineering, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Kruseman, G. P. & De Ridder, N. A. (1990). *Analysis and evaluation of pumping test data*, ILRI Publication 47', International Institute for Land Reclamation and improvement, The Netherlands.
- Loza- Aguirre, I., Nieto- Samaniego, A., Alaniz- Álvarez, S. & Ortega- Obregón, C. (2012). *Cenozoic volcanism and extension in northwestern Mesa Central, Durango, México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, volumen 64, número 2. México. p.p. 243-263
- Lubimova, E. A. (1968). Thermal history of the Earth. *The Earth's Crust and Upper Mantle*, Geophys. Mon. Ser, American Geophysical Union. Washington, United States of America. P. 63
- ASTER GDEM Validation Team (2009). *ASTER global DEM validation summary report*. METI & NASA, 28pp.
- McKee, J. W., Jones, N. W. & 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
- Moench, A.F. (1985). *Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers*. Water Resources Research, vol. 21, no. 8, pp. 1121-1131.

Neuman, S.P. (1974). *Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response*. Water Resources Research, vol. 10, no. 2, pp. 303-312.

Nieto- Samaniego, Á., Alaniz- Álvarez, S. & Labarthe- Hernández, G. (1997). *La deformación Cenozoica porlaramídica en la parte meridional de la Mesa Central, México*. Revista Mexicana De Ciencias Geológicas, 14(1).

Nieto- Samaniego, A., Ferrari, L., Alaniz- Alvarez, S., Labarthe- Hernández, G. & Rosas-Elguera, J. (1999). *Variation of Cenozoic extensión and volcanism across the southern Sierra Madre Occidental volcanic province, Mexico*. Geological Society of America Bulletin, 111(3).

Renard, P., Glenz, D., & Mejias, M. (2009). *Understanding diagnostic plots for well-test interpretation*. Hydrogeology Journal, 17(3), 589-600.

Surfer 13. (2015). Colorado: Golden Software Inc. United States of America. Available at: <https://www.goldensoftware.com/>

Tago, J. & Hernández-Espriú, J. A. (2017). *A B-Spline Framework for Smooth Derivative Computation in Well Test Analysis Using Diagnostic Plots*. Ground Water, 56(1). p.p. 131-142

Team, Q. D. (2002). Qgis. OSGeo. Available at: <https://www.qgis.org/es/site/index.html>

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), p.p. 519-524.

## **APÉNDICE**

CVE_INT	CVE_CNA	Tipo_Apv	Loc	Uso	X	Y	MDE_ASTER	A/I
P049	CNA-1006-190	Pozo	La Candela	Doméstico	436577.088741713	2795340.1056124	1752.8275146	Activo
M01	NoData	Manantial	La Candela	Sin uso	437537.242615642	2795202.52442724	1752.6829834	Activo
M02	NoData	Manantial	La Candela	Terapeutico	437663.924623685	2795135.78202717	1754.1799316	Activo
M03	NoData	Manantial	Sandías	Terapeutico	440213.29768365	2792631.79839006	1733.9099121	Activo
M04	NoData	Manantial	Sandías	Sin uso	440200.138445284	2792736.28275179	1732.923584	Activo
M05	NoData	Manantial	Sandías	Sin uso	440179.686694348	2792742.15926054	1734.0820312	Activo
P075	CNAG2	Pozo	Sandías	Doméstico	440349.640067891	2791951.92007654	1752.0254806	Activo
P046	CNA-1006-157	Pozo	Los Herrera	Sin uso	442065.012815823	2787930.67286919	1721.7686768	Inactivo
N101	Inédito	Noria	NoData	NoData	442092.763189622	2787858.75961953	1722.414917	NoData
P077	Inédito	Pozo	Los Corrales	Agrícola	442142.675730657	2789486.80996529	1719.5404053	Activo
P078	Inédito	Pozo	Los Corrales	Sin uso	441951.35692452	2786497.77705516	1761.571167	Inactivo
P086	Inédito	Pozo	Los Pascuales	Agrícola	443376.989242119	2786272.81348193	1725.6264648	Activo
P087	CNA-1006-71	Pozo	Los Pascuales	Pecuario	444397.270123116	2785236.80447212	1718.6424561	Activo
P045	CNA-1006-138	Pozo	Los Herrera	Doméstico	444818.832197125	2785807.33227216	1702.6677246	Activo
M06	NoData	Manantial	Los Pascuales	Sin uso	444835.518286721	2785799.51285088	1702.6677246	Inactivo
N104	Inédito	Noria	NoData	NoData	444847.934768472	2785637.86098645	1709.0075684	NoData
P042	CNA-1006-156	Pozo	Santiago Papasquiario	Doméstico	447560.808737975	2783111.794994	1736.2501221	Activo
N086	CNA-1006-076	Noria	La Trinidad	Pecuario	449119.471708793	2783205.37968741	1697.3526611	Activo
N106	Inédito	Noria	Los Herrera	Agrícola	449163.113994077	2783242.57094931	1695.3140869	Activo
P041	CNA-1006-149	Pozo	Santiago Papasquiario	Doméstico	448638.091097971	2782670.25452441	1701.6218262	Activo
P081	Inédito	Pozo	El Entronque	NoData	452308.971509422	2778553.02158777	1770.9545898	NoData
P082	Inédito	Pozo	El Entronque	NoData	452298.344722834	2778692.15945533	1764.0635986	NoData
M07	NoData	Manantial	Hervideros	Doméstico	466960.489180129	2739213.80365485	1847.4707031	Activo
P083	Inédito	Pozo	Rancho el 33	NoData	451159.345442121	2782190.66293028	1686.2374268	NoData
N107	Inédito	Noria	Rancho el 34	Doméstico	451424.087346786	2782108.79421015	1685.364502	Activo
N108	Inédito	Noria	Casas Coloradas	NoData	449782.986494797	2777491.02189514	1804.838501	NoData
P084	Inédito	Pozo	Sin dato	Doméstico	450033.900667956	2777558.23703325	1803.8778076	Activo
P031	CNA-1006-121	Pozo	Martinez de Arriba	Pecuario	452964.554936164	2777119.99141254	1751.5522461	Activo
M08	NoData	Manantial	Los Ojitos	Sin uso	466960.489180129	2739213.80365485	1847.4707031	Inactivo
N109	CNA-1006-257	Noria	San Manuel	NoData	466399.203309377	2740433.71696857	1836.1136475	NoData
N110	Inédito	Noria	Santa Teresa	Sin uso	467919.142903456	2743806.2333169	1831.1646729	Inactivo
N111	Inédito	Noria	Santa Teresa	NoData	467910.537748491	2743836.23279456	1829.5838623	NoData
N112	Inédito	Noria	San Miguel	Sin uso	467913.194832268	2743895.94562321	1830.1595459	Inactivo
N113	Inédito	Noria	San Miguel	Sin uso	467891.575562676	2743867.1975412	1830.746582	Inactivo
N114	Inédito	Noria	San Miguel	Agrícola	467698.581588222	2744439.62935731	1825.4251709	Activo
P01	CNA-1006-004	Pozo	Santa Rita del Pachon	Doméstico	466441.549848277	2746110.94693459	1822.2902832	Activo
N115	Inédito	Noria	NoData	Sin uso	465513.628965254	2746776.82076907	1819.4472656	Inactivo
P02	CNA-1006-011	Pozo	Santa Rita del Pachon	Doméstico	465674.110697246	2746728.00421508	1815.3337402	Activo
P06	CNA-1006-196	Pozo	Llano Prieto	Doméstico	462981.502510732	2751581.03388496	1796.2783203	Activo
N116	Inédito	Noria	El Terrero	NoData	462770.772719843	2754516.35283452	1784.8695068	NoData
M09	NoData	Manantial	El Terrero	Sin uso	462802.671981395	2754502.12997498	1784.3648682	Inactivo
P090- P091	Inédito	Pozo	NoData	NoData	457585.927090559	2769128.30972504	1726.5672607	NoData
P092	Pozo Real Campestre	Pozo	Santiago Papasquiario	Doméstico	458238.536850253	2768425.6696266	1726.7947998	Activo
P093	Pozo Paraíso	Pozo	Santiago Papasquiario	Doméstico	458325.080009368	2768246.13037546	1730.6477051	Activo
P094	Pozo Papasquiario	Pozo	Santiago Papasquiario	Doméstico	458227.814144202	2768518.02516989	1725.0102539	Activo
M10- c	NoData	Manantial	Santiago Papasquiario	Doméstico	462802.671981395	2754502.12997498	1784.3648682	Activo
M10- m	NoData	Manantial	Santiago Papasquiario	Doméstico	456098.280977472	2769145.42199806	1750.9315186	Activo

Tabla 7.1 Base de datos general del proyecto.

CVE_INT	Prof	PNE_2010	PNE_2012	PNE_2019	PND_2019	ENE_2019	Obs
P049	76.15	-9999	-9999	6.73	-9999	1746.10	Diferentes coordenadas a las marcadas por la CNA.
M01	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
M02	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
M03	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
M04	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
M05	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
P075	-9999	-9999	-9999	28.48	-9999	1723.55	Tubería de descarga de 8", ademe de 14".
P046	114.01	-9999	-9999	28.38	-9999	1693.39	Diferentes coordenadas a las marcadas por la CNA.
N101	-9999	-9999	-9999	8.92	-9999	1713.49	Sección 1.5x1.5 m
P077	-9999	-9999	-9999	3.63	-9999	1715.91	Tubería de succión de 6", tubería de descarga de 8" y posteriormente de 6", bomba de aceite de 50 hp. Profundidad de Noria pero estructura de pozo.
P078	-9999	-9999	-9999	31.3	-9999	1730.27	Pozo de perforación, diámetro de 18", sin ademe.
P086	-9999	-9999	-9999	11.56	-9999	1714.07	NoData
P087	-9999	-9999	-9999	13.15	-9999	1705.49	NoData
P045	-9999	-9999	22	-9999	-9999	-9999	Diferentes coordenadas a las marcadas por la CNA. No sondeable, bomba sumergible, tubería de descarga de 4".
M06	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
N104	-9999	5.33	-9999	-9999	-9999	-9999	Sin acceso, casa habitación.
P042	-9999	53.3	-9999	-9999	-9999	-9999	Sin acceso.
N086	-9999	2.16	-9999	4.8	-9999	1697.35	Diferentes coordenadas a las marcadas por la CNA. 2 m de diámetro,
N106	-9999	-9999	-9999	3.51	-9999	1695.31	1.2 m de diámetro
P041	75.09	9.69	-9999	9.67	-9999	1701.62	Diferentes coordenadas a las marcadas por la CNA. Bomba sumergible, tubería de descarga de 3", ademe de 8", acumulador de 088229 [m³].
P081	-9999	-9999	-9999	35.87	-9999	1770.95	NoData
P082	-9999	-9999	-9999	41.39	-9999	1764.06	NoData
M07	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Surge por medio de fracturas, fracturas principales: N27°E, 75°; N39°E, 78°; N63°E, 68°. Fracturas secundarias: N15°W, 50°; S80°E, 88°.
P083	-9999	-9999	-9999	2.5	-9999	1686.23	Bomba sumergible a aproximadamente 50 m, 4l/s
N107	-9999	-9999	-9999	3.78	-9999	1685.36	NoData
N108	-9999	-9999	-9999	6.67	-9999	1804.83	NoData
P084	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	No se pudo acceder por presencia de panal.
P031	65.6	41.34	-9999	-9999	-9999	-9999	Diferentes coordenadas a las marcadas por la CNA. Tubería de descarga de 2". Se rompió la sonda por lo que no se pudo realizar la medición.
M08	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NoData
N109	-9999	-9999	-9999	1.09	-9999	1836.11	NoData
N110	-9999	-9999	-9999	2.26	-9999	1831.16	Diámetro de 3.05 m. Noria inactiva.
N111	-9999	-9999	-9999	2.49	-9999	1829.58	NoData
N112	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Inactiva. No sondeable.
N113	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Inactiva. No sondeable.
N114	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Sin acceso.
P01	-9999	24.43	-9999	-9999	-9999	-9999	Diferentes coordenadas a las marcadas por la CNA. Sin acceso.
N115	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Sin acceso.
P02	76.8	4	-9999	-9999	-9999	-9999	Sin acceso.
P06	78	-9999	5.5	5.96	-9999	1796.27	Bomba sumergible, tubería de descarga de 2".
N116	-9999	-9999	-9999	1.6	-9999	1784.86	Diámetro de 3 m, agua con 22 hrs estancada.
M09	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Caudal de 0.14 l/s
P090-P091	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Sin acceso.
P092	-9999	-9999	-9999	-9999	130	-9999	Bomba sumergible, tubería de salida de 4".
P093	-9999	-9999	-9999	-9999	130	-9999	Bomba sumergible, tubería de salida de 4".
P094	-9999	-9999	-9999	-9999	130	-9999	Bomba sumergible, tubería de salida de 6".
M10- c	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Construcción de manantial
M10- m	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Manantial directo

Tabla 7.1 Base de datos general del proyecto.

CVE_INT	X	Y	DATOS FISICOQUÍMICOS				
			Temperatura [°C]	Conductividad eléctrica [ $\mu^*cm$ ]	Total de sólidos disueltos [ppm]	pH	Eh [V]
P049	436577.0887	2795340.1056	28	254	127	7.65	-0.03
M01	437537.2426	2795202.5244	38	181	91	7.93	-0.17
M02	437663.9246	2795135.7820	34	-9999	-9999	-9999	-9999
M03	440213.2977	2792631.7984	68	479	240	7.64	-0.19
M04	440200.1384	2792736.2828	58	-9999	-9999	-9999	-9999
M05	440179.6867	2792742.1593	65	-9999	-9999	-9999	-9999
P077	442142.6757	2789486.8100	25	249	125	8.43	-0.21
M06	444835.5183	2785799.5129	20	557	278	6.8	0.01
P081	452308.9715	2778553.0216	24	480	240	7.6	0.16
P082	452298.3447	2778692.1595	24.5	460	230	7.81	0.13
M07	452253.2000	2782159.3000	74.5	1019	510	6.75	-0.08
P083	451159.3454	2782190.6629	30	340	170	7.37	-0.04
N107	451424.0873	2782108.7942	21	310	155	7.22	0.23
N108	449782.9865	2777491.0219	22	367	183	7.2	0.31
M08	466960.4892	2739213.8037	39	267	133	7.24	0.18
N109	466399.2033	2740433.7170	25	240	120	7.38	0.30
N111	467910.5377	2743836.2328	24	189	94	6.57	0.38
P06	462981.5025	2751581.0339	24	247	124	8.36	0.42
N116	462770.7727	2754516.3528	25.5	286	143	8.34	0.43
M09	462802.6720	2754502.1300	24	263	132	8.35	0.42
P092	458238.5369	2768425.6696	25	484	242	8.74	0.16
P093	458325.0800	2768246.1304	25	326	163	8.46	0.26
P094	458227.8141	2768518.0252	24	394	197	8	0.31
M10- c	462802.6720	2754502.1300	35	1034	517	7.82	0.12
M10- m	456098.2810	2769145.4220	43	1067	534	6.74	0.04

Tabla 7.2 Base de datos fisicoquímicos del proyecto.