

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA



MEMORIA DE PRÁCTICAS PROFESIONALES

**"METODOLOGÍA PARA LLEVAR A CABO LA
PERFORACIÓN DE UN POZO EXPLORATORIO Y/O
PRODUCTIVO DE AGUA"**

EMPRESA:
**INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE ACUÍFEROS Y
AMBIENTE S.A. DE C.V.**

Que para obtener el título de:

GEÓLOGO

Presenta:

NAYELI CHANG RODRÍGUEZ

Hermosillo, Sonora, México.

Marzo de 2018.

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Objetivo de la perforación	2
1.3. Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente S.A. de C.V...	2
1.4. Posicionamiento de UNISON respecto a prácticas profesionales .	4
2. CICLO HIDROLÓGICO.....	5
2.1. Agua subterránea en el ciclo hidrológico.....	5
2.2. Conceptos básicos de hidrogeología.....	7
2.3. Características hidráulicas de las rocas.....	9
2.3.1. Porosidad (n).....	9
2.3.2. Permeabilidad (k).....	10
2.3.3. Conductividad hidráulica (K).....	10
2.3.4. Transmisividad (T).....	11
2.3.5. Capacidad de almacenamiento	11
2.3.6. Coeficiente de almacenamiento (S).....	11
2.4. Tipos de acuíferos	12
3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	15
3.1. Estudios previos	15
3.2. Fisiografía	16
3.3. Clima	18
3.4. Hidrografía.....	20
3.5. Geomorfología	22
3.6. Estratigrafía	23
3.6.1. Estratigrafía piezómetro MX-03	23
3.6.2. Estratigrafía pozo productivo TC-06.....	25
4. EXPLORACIÓN GEOFÍSICA	30
4.1. Método electromagnético	30
4.2. Levantamiento geofísico piezómetro MX-03 (TZ2-03)	31
4.2.1. Perfil de resistividad NW-SE 04	34
4.2.2. Perfil geoeléctrico NW-SE 04.....	36

4.2.3. Sitios propuestos	37
4.3. Levantamiento geofísico pozo de producción TC-06.....	39
4.3.1. Perfil de resistividad SW-NE 02	42
4.3.2. Perfil geoelectrico SW-NE 02.....	43
4.3.3. Sitios propuestos	44
5. MÉTODO DE PERFORACIÓN	45
5.1. Maquinaria empleada	45
5.2. Perforación con barrena tipo martillo neumático descendente ...	47
5.3. Perforación con barrena tipo rotaria	48
5.4. Fluidos de perforación	49
5.4.1. Propiedades de los fluidos.....	50
5.4.1.1. Densidad	50
5.4.1.2. Viscosidad.....	51
5.4.1.3. Gelatinización	52
5.4.1.4. Punto cedente	52
5.4.1.5. Filtrado.....	53
5.4.1.6. Enjarre	53
5.4.1.7. pH.....	53
5.4.1.8. Cloruros	54
5.4.2. Funciones de los fluidos.....	54
5.4.2.1. Remoción del “recorte” del fondo del pozo.....	54
5.4.2.2. Ademar paredes del pozo.....	55
5.4.2.3. Enfriamiento de la barrena de perforación.....	55
5.4.2.4. Suspensión de cortes y fragmentos	55
6. DESARROLLO DE PRÁCTICAS PROFESIONALES	56
6.1. Etapa exploratoria	56
6.1.1. Construcción de Piezómetro MX-03.....	56
6.1.2. Localización.....	56
6.1.3. Metodología.....	57
6.1.4. Clasificación y análisis de muestras.....	60
6.1.5. Prueba air lift	62
6.1.5.1. Resultados prueba air lift piezómetro MX-03	66
6.2. Etapa productiva	68
6.2.1. Construcción de Pozo TC-06	68
6.2.2. Localización.....	68
6.2.3. Metodología.....	69
6.2.3.1. Clasificación y análisis de muestras.....	74
6.2.3.2. Ademado	75

6.2.3.3. Engravado	77
6.2.4. Diseño de pozo	78
7. PRUEBA DE AFORO	79
7.1. Generalidades	79
7.2. Ejecución de la prueba	80
7.2.1. Datos generales de la prueba hidráulica	80
7.2.2. Prueba de desarrollo del pozo.....	80
7.2.3. Prueba de aforo del pozo	86
7.2.4. Prueba de aforo a caudal constante.....	89
7.3. Interpretación de resultados.....	93
7.3.1. Prueba de Aforo.....	93
7.3.1.1. Transmisividad (T).....	93
7.3.1.2. Conductividad hidráulica (K).....	94
7.3.1.3. Coeficiente de almacenamiento (S)	95
7.3.1.4. Radio de influencia teórico.....	101
7.4. Conclusiones y discusiones	103
8. CONCLUSIÓN	107
9. AGRADECIMIENTOS	107
10. BIBLIOGRAFÍA	108

1. INTRODUCCIÓN

El presente informe tiene como objetivo detallar la metodología de las actividades realizadas durante las prácticas profesionales llevadas a cabo en la empresa *Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente (IDEAS)*. Dichas actividades constan, principalmente, de la supervisión durante la perforación y construcción tanto de pozos exploratorios como de producción.

Las labores se llevaron a cabo con apoyo de geólogos, técnicos y trabajadores especializados en el rubro de la perforación de pozos, siempre en constante comunicación para brindar información certera y evitar en lo posible sucesos infortunados.

1.1. Generalidades

Para el aprovechamiento del agua subterránea se requieren obras de captación denominadas pozos de bombeo, éstos suministran agua a diversos tipos de asentamientos humanos; pequeñas comunidades, grandes ciudades, parques industriales, zonas agrícolas, entre otras. Por lo anterior, es de vital importancia comprender los aspectos básicos de la geohidrología para prever el comportamiento del agua en el subsuelo y ser capaz, además, de entender la importancia del método constructivo para correlacionarlos entres si de manera eficaz.

Es posible estimar (de manera directa) las características hidráulicas de los acuíferos fracturados mediante pruebas de inyección de aire a presión y de bombeo realizadas en captaciones de agua subterránea preexistentes y barrenos de exploración. Esta información se integra con el análisis piezométrico en el cual se definen las direcciones de flujo con relación a las variaciones de la carga hidráulica en cada pozo o barreno, para definir cuantitativamente la recarga y descarga del acuífero mediante un balance de aguas subterráneas.

1.2. Objetivo de la perforación

Para lograr un desarrollo adecuado en el proceso de perforación, tanto de pozos exploratorios como productivos, fue necesario realizar un análisis de los trabajos e informes previos de la zona. Una vez comprendida la estructura y organización de toda la información obtenida, se procede a interpretar la geología y estructuras que afectan a la zona de estudio por medio del método geofísico de exploración denominado Sondeo Transitorio Electromagnético en el dominio del tiempo (TDEM por sus siglas en inglés), el cual tiene la mayor eficiencia resolutive y gran sensibilidad a la presencia de agua o de materiales saturados. Conociendo la distribución y características geológicas locales y regionales, así como de las unidades resistivas en el subsuelo, es posible llevar a cabo interpretaciones que lleven a caracterizar el sistema hidrogeológico y proponer sitios de interés para llevar a cabo una exploración directa.

1.3. Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente S.A. de C.V.

IDEAS S.A. de C.V. es una empresa especializada en consultoría hidrogeológica fundada en 1987 por el Dr. Miguel Rangel Medina, quien es autor de numerosas publicaciones tanto nacionales como internacionales, así como consultor hidrogeólogo con más de cuarenta y tres años de experiencia (Cretot, 2016). Profesor de Hidrogeología, Hidrogeoquímica y Geología Ambiental del departamento de Geología de la Universidad de Sonora desde 1997 y actual presidente de la Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo (ALHSUD), así como de la International Association of Hydrogeologists, Capítulo México (IAH).

Con sede en Hermosillo, Sonora, IDEAS S.A. de C.V. se ha consolidado como una consultoría mexicana con más de 30 años de experiencia dedicada a resolver problemas hidrogeológicos y ambientales de índole nacional. Los proyectos y servicios que ofrece, se desarrollan en torno a las siguientes áreas:

- **Diseño de redes de monitoreo:** observación de la correlación entre conductividad eléctrica y la geofísica para examinar la migración de plumas de contaminación, calidad del agua o piezometría de acuíferos considerando su distribución espacial y profundidad.
- **Estudios hidrogeológicos:** integración de bases de datos para el análisis del agua superficial y/o subterránea, con el fin de definir los patrones de recarga y descarga, dimensión de escorrentía, infiltración y evapotranspiración a nivel regional (cuenca), subregional (subcuenca) o local (microcuenca). Lo anterior determina los volúmenes de agua disponibles y pretende dar solución al abasto de agua o evitar el riesgo de inundación de un determinado sitio.
- **Estudios y exploración geofísica:** visualización de las condiciones hidrogeofísicas del subsuelo a través de distintos tipos de sondeos geofísicos para ubicar zonas adecuadas de prospección de agua subterránea, evitando así realizar perforaciones al azar.
- **Hidroecología:** análisis y descripción del agua, caudal ecológico, principales fuentes de afectación y grado de las mismas, obtención del gasto ecológico, entre otros parámetros que ayudan a conocer el ecosistema previo a cualquier construcción.
- **Hidrogeología ambiental:** integración y análisis de datos históricos de escurrimientos a nivel cuenca, como parte del Sistema Ambiental Regional (SAR) de cada proyecto.
- **Hidrogeoquímica:** se pretende determinar la edad relativa del agua, calidad, medidas de control, uso, mitigación de riesgos, mecanismos de origen y movimiento del flujo (superficial y/o subterráneo).
- **Pruebas de bombeo sustentable:** se obtiene el caudal óptimo para cada pozo durante la prueba de aforo, así como también los parámetros hidráulicos que van a definir el equipamiento y condiciones de operación del mismo.

El reconocimiento de IDEAS S.A. de C.V. por la calidad de sus productos y/o servicios, se denota en la trayectoria que la empresa lleva en el mercado, así como la sólida base de la experiencia de su fundador y la competencia de todos los empleados que laboran en la empresa, la cual se encuentra buscando siempre una mejora continua a través del cumplimiento de objetivos y expectativas del cliente adaptándose a su vez a las inflexiones del mercado y economía global.

1.4. Posicionamiento de UNISON respecto a prácticas profesionales

Son un conjunto de actividades y quehaceres propios de la formación profesional del estudiante, que le permite relacionarse con el medio laboral donde se desempeñará y le da la oportunidad de aplicar los conocimientos y habilidades adquiridas a través de su formación académica en el programa educativo.

Objetivo

Consolidar la formación profesional del estudiante a través de la interrelación de conocimientos teóricos y prácticos, con el fin de desarrollar habilidades y competencias profesionales en contextos laborales, vinculados estrechamente con el perfil de egreso de la licenciatura cursada.

Objetivo particular de la Licenciatura en geología

Retomar los conceptos y principios básicos de la geología aprendidos en el eje de formación común y básica, para poder aplicarlos en el campo laboral en donde a la vez se requerirán actitudes, valores y habilidades sociales propias de cada persona.

2. CICLO HIDROLÓGICO

2.1. Agua subterránea en el ciclo hidrológico

El agua subterránea forma parte de un gran sistema circulatorio en constante movimiento que tiene lugar en el planeta Tierra, como ya es bien sabido, este ciclo engloba el agua en sus tres formas: sólida, líquida y gaseosa.

El ciclo hidrológico no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua; el agua se *evapora* desde los océanos y desde la superficie terrestre para volverse parte de la atmósfera; sitio en el que se condensa y *precipita* sobre la superficie terrestre o alguna superficie líquida (ríos, lagos, océanos, etc.). Cuando sucede lo primero, el agua queda interceptada por la vegetación desde donde una parte se evapora (volviendo a la atmósfera) y otra parte escurre hacia el suelo y se infiltra convirtiéndose en *flujo subsuperficial*. Otro camino que puede recorrer el agua precipitada sobre la superficie terrestre, es convertirse en *flujo superficial* sobre el suelo, en cualquiera de los dos casos el agua descarga en los ríos como *escorrentía superficial* (Chow, 1994).

Cuando el agua infiltrada percola profundamente, puede llegar a los mantos de agua y alimentar el caudal base de los ríos a través del flujo subterráneo. Es posible que el agua que se infiltra en el suelo pueda volver a la superficie en forma de manantiales o bien, profundizar aún más y tener grandes recorridos hacia el mar u otras depresiones, en cualquier caso, la mayor parte de los movimientos de agua subterránea son muy lentos (Figura 1).

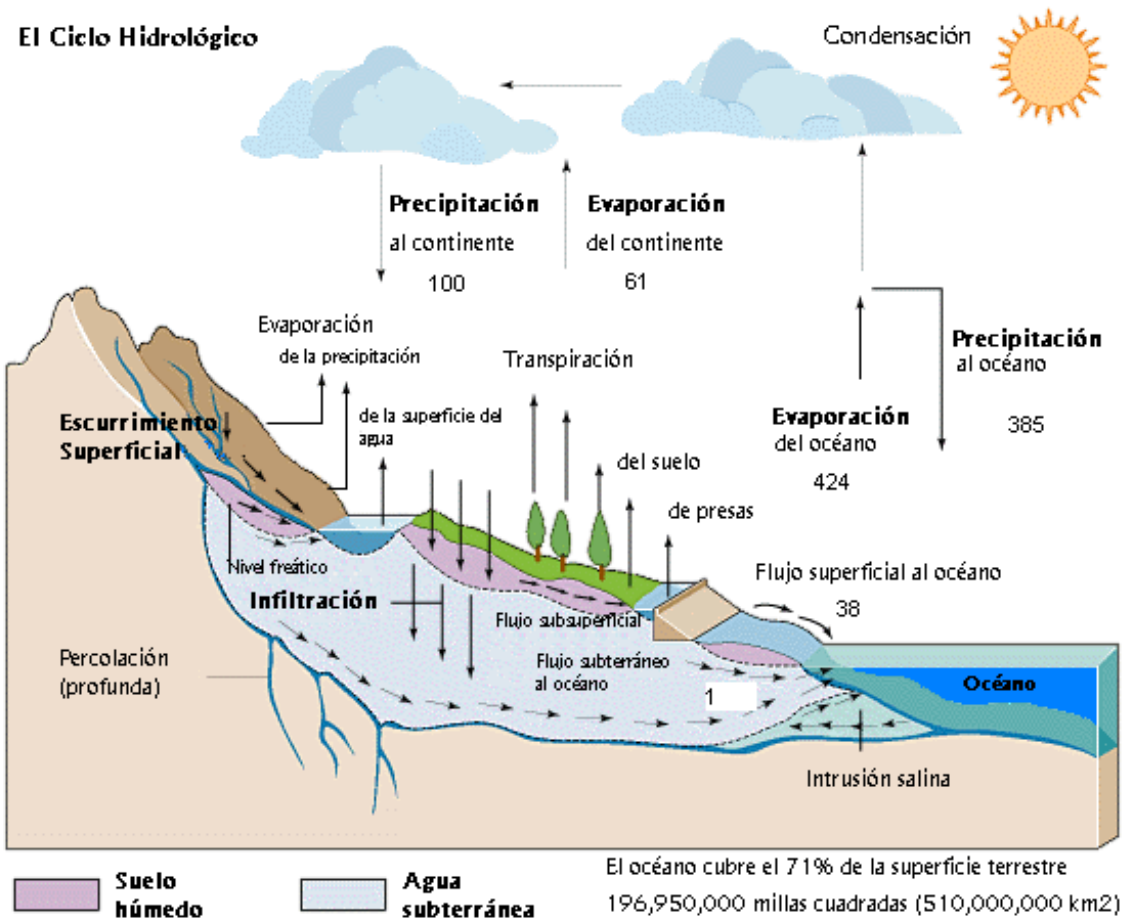


Figura 1. Esquema del Ciclo Hidrológico, considerando a la precipitación terrestre como el 100%. Por Chow (1994).

A pesar de que el concepto de ciclo hidrológico es simple, el fenómeno es enormemente complejo e intrincado. Éste no es solamente un ciclo grande, sino que está compuesto de muchos ciclos interrelacionados de extensión continental, regional y local. Aunque el volumen total de agua en el ciclo hidrológico global permanece esencialmente constante, la distribución del agua está cambiando continuamente en continentes, regiones y cuencas locales de drenaje. A medida que la civilización progresa, las actividades humanas invaden gradualmente el medio ambiente natural del agua, alterando el equilibrio dinámico del ciclo hidrológico e iniciando nuevos procesos y eventos.

2.2. Conceptos básicos de Hidrogeología

La **hidrogeología** es una rama de las ciencias geológicas que estudia las aguas subterráneas en lo relacionado con su circulación, sus condicionamientos geológicos y su captación; a diferencia de la **hidrología** la cual se enfoca en la distribución espacio-temporal y las propiedades del agua presente tanto en la atmósfera como en la corteza terrestre. Por las implicaciones de ambas, el ser humano tiene mayor conciencia de esta última puesto que tiende a desarrollar sus actividades dentro de unidades fisiográficas elementales denominadas cuencas.

Una cuenca hidrográfica es una porción de terreno delimitada geográficamente por divisorias de agua, que corresponden a las cimas de las colinas o las montañas que rodean los terrenos y sus componentes coluvio-aluviales, ladera abajo. Las cuencas son producto de procesos geomorfológicos. (Núñez, 2001, p.43)

En otras palabras, una cuenca hidrográfica es un área del terreno en donde toda el agua que cae de las precipitaciones se une para formar un solo curso de agua, la divisoria natural es el parteaguas formado por los puntos de mayor nivel topográfico. Las cuencas suelen clasificarse en endorreicas; si el punto de salida se encuentra dentro de los límites de la cuenca (como un lago), o bien exorreicas si el punto de salida se ubica en los límites de la cuenca, otra corriente o mar (Figura 2).

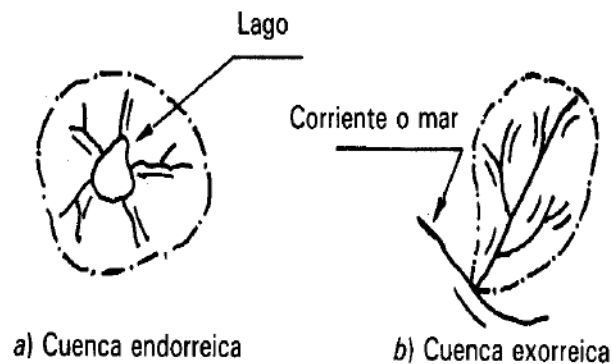


Figura 2. Tipos de cuencas. Por Núñez, (2001).

Ordoñez (2011), indica que dentro de una cuenca hidrográfica existen otras categorías como *subcuencas*, en las que se desarrolla el drenaje directamente al curso principal de la cuenca y *microcuencas* que dirigen su drenaje a la corriente principal de una subcuenca (Figura 3). Es relevante mencionar que a diferencia de una cuenca hidrográfica, las cuencas hidrológicas incluyen aguas subterráneas (acuíferos).

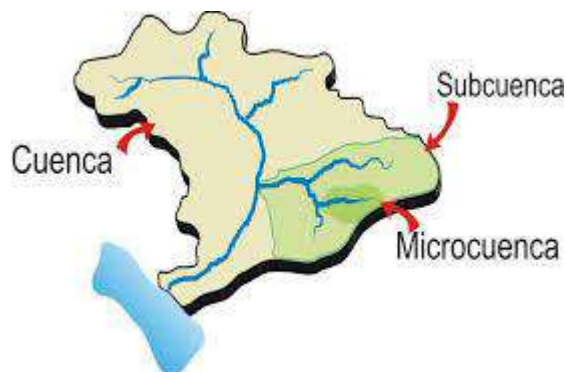


Figura 3. Categorías de cuencas. Por Ordoñez, (2011).

El grado de bifurcaciones que pueden llegar a existir dentro de una cuenca, está dado por el orden de las corrientes. Una pequeña corriente sin tributarios será de primer orden, una corriente de segundo orden solamente tendrá tributarios de primer y segundo orden, y así sucesivamente (Figura 4).

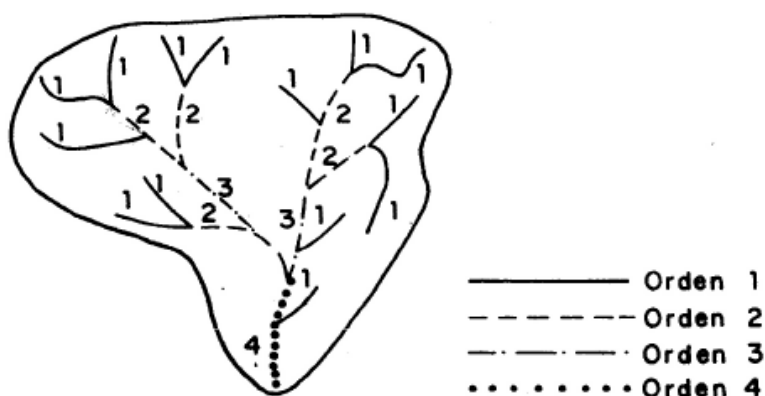


Figura 4. Determinación del orden de las corrientes dentro de una cuenca por el método de Strahler. Por Ordoñez, (2011).

2.3. Características hidráulicas de las rocas

La importancia de conocer factores litológicos como granulometría, grado de fracturamiento, cementación, compactación, etc., radica en que éstos van a determinar las cantidades de agua que las rocas pueden almacenar, ceder y transmitir (CONAGUA, 2007, pp. 10-17).

2.3.1. Porosidad

Se refiere a la medida de la cantidad de vacíos que tiene un material y se define como la relación (expresada en porcentaje) entre su volumen de vacíos (V_v) y el volumen total del suelo (V_t):

$$n = \frac{V_v}{V_t}$$

En general, cuanto mayor es el tamaño del grano menor es la porosidad porque las partículas chicas llenan los espacios entre las mayores. Cuando los materiales se compactan, los granos tienden a acomodarse reduciendo el volumen de vacíos, por ende, la porosidad decrece conforme aumenta la profundidad a la que se encuentra el material. Además de lo anterior, la porosidad puede clasificarse en primaria y secundaria; la primera resulta de la diagénesis mientras que la segunda es producto de los rasgos estructurales provocados en ella por procesos geológicos y tectónicos.

Tabla 1. Intervalo de porosidad de materiales más comunes (Cherry, Freeze, 1979)

MATERIALES	n(%)
Depósitos no consolidados	
Arcilla	40-70
Limo	35-50
Arena	25-50
Grava	25-40
Rocas	
Arenisca	5-20
Lutita	5-10
Basalto Fracturado	5-50
Caliza Cárstica	5-50
Dolomía o Caliza	0-20
Rocas Cristalinas Fracturadas	0-10
Rocas Cristalinas Densas	0-5

2.3.2. Permeabilidad (k)

La permeabilidad (k), depende fundamentalmente de la velocidad de circulación del agua en el subsuelo por lo que se mide en unidades de velocidad (L/T) o en darcys (1 darcy = 10^{-8} cm/s). La permeabilidad de las rocas va a depender principalmente del tamaño de los poros y de la interconexión entre los mismos.

2.3.3. Conductividad hidráulica (K)

Se refiere a la cantidad de agua que circula a través de una sección de área unitaria normal al sentido de flujo, bajo un gradiente hidráulico unitario. Se expresa en unidades de velocidad (m/s o m/día). Puesto que depende tanto de las propiedades del fluido como de las características de medio, se toma en cuenta K como función del peso específico del fluido, de su viscosidad dinámica, de una longitud característica “d”, que es el promedio del tamaño de los poros del medio y del factor de forma C, que toma en cuenta los efectos de la estratificación, empaquetamiento, disposición de los granos, distribución de tamaño y de la porosidad. En resumen, la conductividad hidráulica es la medida de la habilidad de la roca fracturada o el medio poroso para transmitir el agua y el valor obtenido depende de la dirección en que esté fluyendo el agua a través del medio poroso, además, las variaciones físicas del agua influyen en la misma.

Tabla 2. Valores medio de Conductividad hidráulica y Permeabilidad para diferentes litologías. Por CONAGUA, 2007.

Material	K, cm/seg	k, darcys
Grava	$1 - 10^2$	$10^{-3} - 10^{-4}$
Arena limpia	$10^{-3} - 1$	$1 - 10^{-2}$
Arenas arcillosas y arenas finas	$10^{-6} - 10^{-3}$	$10^{-3} - 1$

2.3.4. Transmisividad (T)

Hace referencia a la capacidad transmisora de un acuífero y está representada por el coeficiente de transmisividad (T), cuyo valor es calculado como el producto de su conductividad hidráulica (K) y espesor saturado (b):

$$T = Kb$$

Es definida como la cantidad de agua que pasa a través de una sección vertical de un metro de ancho y altura igual al espesor saturado del acuífero, bajo un gradiente hidráulico unitario (unidades de longitud al cuadrado sobre tiempo). Este factor se determina mediante la prueba de bombeo y conociendo su valor, es posible calcular la cantidad de agua que transmite el acuífero a través de una sección de interés o estimar el probable rendimiento del mismo.

2.3.5. Capacidad de almacenamiento

Hace referencia a la capacidad que tiene un acuífero para ceder o almacenar agua dependiendo de sus características y de las condiciones hidráulicas en las que se encuentre (libre o confinado), además de la presión total ejercida por el peso de los materiales sobreyacentes; la presión total soportada por material sólido se denomina **presión intergranular**, mientras que la presión soportada por el agua recibe el nombre de **presión intersticial** o de poro. Si el nivel de agua desciende, las moléculas de agua se expanden y la roca se contrae cediendo así agua, por el contrario si el nivel asciende, las moléculas de agua se van a comprimir y la roca se expande, por lo que toma cierta cantidad de agua.

2.3.6. Coeficiente de almacenamiento (S)

Se define como la cantidad de agua que libera (o toma) una columna de acuífero de sección horizontal unitaria y altura igual a su espesor saturado, cuando la carga hidráulica desciende (o asciende) una unidad. El coeficiente de almacenamiento es adimensional y su valor es siempre menor a 1.

Un acuífero libre cede mucha más agua, por unidad de abatimiento de la carga hidráulica, que uno confinado compuesto de los mismos materiales y de idénticas dimensiones. La baja capacidad de almacenamiento es una de las principales características desfavorables de los acuíferos confinados.

Por ejemplo, un acuífero libre con coeficiente S de 10^{-1} , cederá una cantidad de agua 1000 veces mayor que un acuífero de las mismas dimensiones y litología, pero confinado y con coeficiente de almacenamiento de 10^{-4} , para un mismo abatimiento.

$$S = \frac{\text{Volumen de agua liberado}}{\text{Volumen total que ha bajado la superficie piezométrica}}$$

2.4. Tipos de acuíferos

En el subsuelo, el agua se encuentra distribuida en dos grandes zonas: la de aereación (no saturada) y la saturada. La primera comprende desde la superficie del terreno hasta donde comienza el nivel freático, incluyendo la zona capilar. La zona saturada está limitada en su parte superior por la superficie freática, definida por el agua que se encuentra a la presión atmosférica; debajo de ella, los materiales se encuentran totalmente saturados (Figura 5).

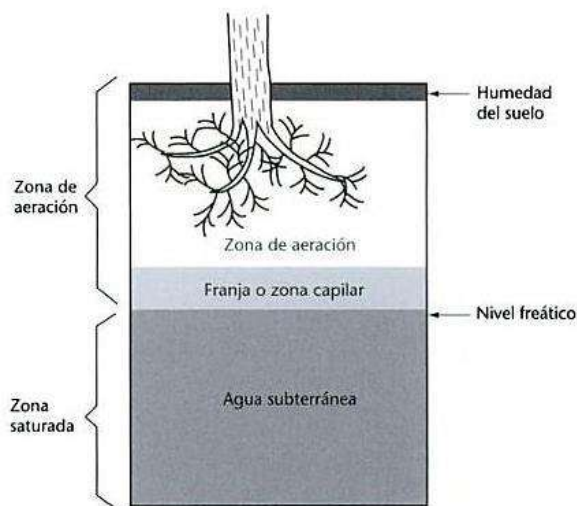


Figura 5. Distribución del agua en el subsuelo. Por Rangel – Medina, 2016.

Los acuíferos pueden tener diversos tamaños y espesores a la vez que actúan como reservorios, almacenando grandes cantidades de agua, o bien como *tubos* capaces de transportar agua subterránea. “Un acuífero es una formación geológica compuesta por rocas permeables o material suelto, el cual produce cantidades variables de agua económicamente explotable cuando es extraída mediante un pozo” (Rangel-Medina, 2016).

Desde el punto de vista *hidráulico*, existen cuatro tipos de acuíferos: libres, colgados, confinados y semi-confinados (Figura 6).

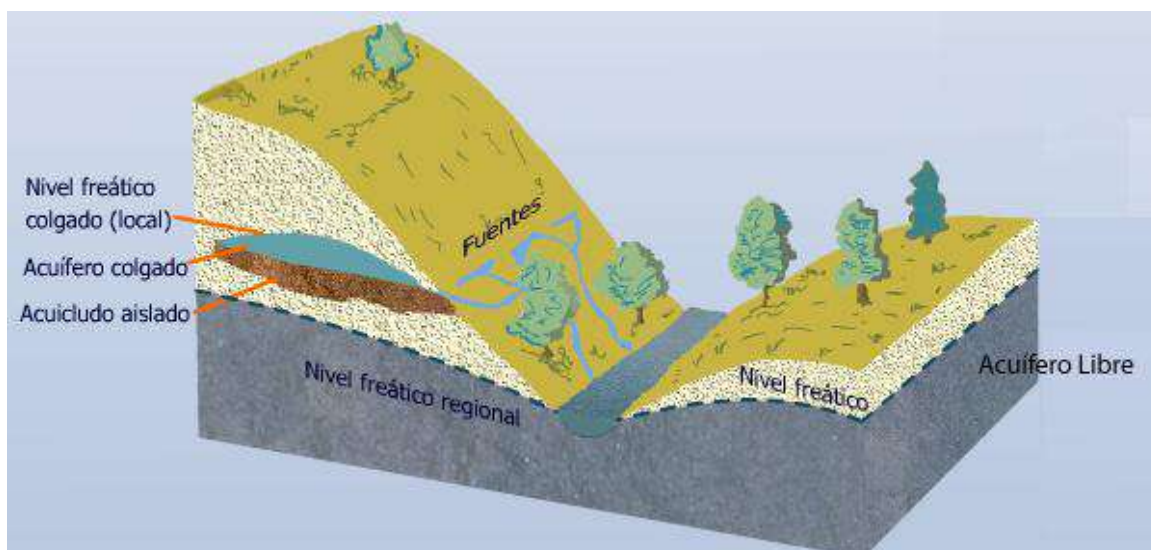


Figura 6. Tipos de acuíferos desde el punto de vista hidráulico. Por Rngel – Medina, (2016).

- **Acuíferos no confinados (libres):** tiene por límite superior a una superficie freática que se encuentra a presión atmosférica funcionando como un conducto abierto, por lo que su espesor saturado varía en el tiempo con las fluctuaciones de esa superficie. Los volúmenes de agua que cede respecto a los acuíferos confinados o semi-confinados son mucho mayores y, además, tiene mayor oportunidad de recarga. Cuando entre la superficie del terreno y su nivel freático se extiende un horizonte de baja permeabilidad que obstaculiza su alimentación local, se considerará un acuífero libre cerrado.
- **Acuífero colgado:** ocurre cuando una parte del agua subterránea se acumula por encima de un estrato impermeable de corta extensión dentro de la zona de aereación, por su cercanía con la superficie puede favorecer la generación de pequeños manantiales.
- **Acuífero confinado:** el nivel de agua en estos pozos se levanta por encima de la frontera superior del acuífero debido a la presión de confinamiento. La superficie imaginaria (definida por los niveles de agua de los pozos que lo captan) se llama “superficie piezométrica”, sus funciones corresponden a cambios en la presión del agua y en un sitio dado puede hallarse arriba o abajo del nivel freático. Donde el nivel piezométrico se halla arriba del terreno, los pozos resultan artesianos brotantes.

- **Acuífero semi-confinado:** es una variedad del acuífero confinado, en su techo se encuentra confinado por un estrato de baja permeabilidad (acuitardo), mismo que permite que el agua fluya lentamente a través de este.

Desde el punto de vista *hidrogeológico*, los acuíferos se clasifican en no consolidados y consolidados.

- **No consolidados:** incluyen depósitos aluviales (gravas, arenas, limos y arcillas), depósitos lacustres, eólicos y materiales coluviales, entre otros. Todos ellos constituyen un medio hidráulicamente continuo; los de grano grueso alojan importantes acuíferos, y los más porosos se comportan como acuitardos.
- **Consolidados:** su comportamiento depende de su porosidad secundaria puesto que tienen menos espacio para transmitir y almacenar agua. En las rocas sedimentarias de composición detrítica; lutitas, limolitas, areniscas y conglomerados, las características hidráulicas son determinadas por su granulometría, fracturamiento y grado de cementación; las de grano grueso poco cementadas y las fracturadas, suelen constituir acuíferos de regular a buena permeabilidad, mientras que las de grano fino se comportan como acuíferos poco permeables o como acuitardos.

Las rocas carbonatadas pueden ser acuíferos de alta permeabilidad cuando su porosidad es desarrollada por disolución, mientras que las rocas ígneas intrusivas y metamórficas, se comportan como acuíferos de baja permeabilidad cuando presentan fracturas no obstruidas.

3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Estudios previos

En el área donde se llevó a cabo la construcción de los pozos TC-06 y MX-03, existen estudios geohidrológicos de cobertura regional, tal como el que realizó la empresa **Ariel Construcciones S.A.**, para la **Dirección de Aguas Subterráneas de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) en 1970, titulado ESTUDIO DE HIDROLOGÍA SUPERFICIAL DE LOS VALLES DE LOS RÍOS SAN MIGUEL, SONORA, ZANJÓN, BACOACHI Y MÁTAPE, SONORA.** Entre las conclusiones destaca que las corrientes de los ríos Sonora, San Miguel y Bacoachi presentan escurrimiento durante todo el año, aunque en algunos tramos se pierde por infiltración. Respecto al tipo de acuífero se menciona de manera general que funciona como acuífero libre, siendo el principal el conglomerado Báucarit, mismo que adquiere un carácter semiconfinado cuando se presentan interdigitaciones de lentes de arcilla.

El pozo TC-06 se encuentra ubicado dentro de la superficie del acuífero denominado río Bacanuchi, el cual según el documento actualizado denominado **DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO 2628 RÍO BACANUCHI, ESTADO DE SONORA, realizado por CONAGUA en el año 2015,** reafirma que el acuífero es de tipo libre presentando condiciones locales de semi confinamiento debido a lentes arcillosos. En su porción superior, se encuentra conformado por depósitos aluviales y conglomerados, mientras que en su porción inferior se tienen rocas sedimentarias y volcánicas fracturadas, en conjunto presentan un espesor promedio de 150 metros. Por otro lado, el pozo MX-03 colinda con el acuífero río Bacoachi que presenta condiciones de confinamiento muy similares al acuífero río Bacanuchi.

Las condiciones de los acuíferos se estudian mediante actividades de campo que incluyen los censos de aprovechamiento, piezometría, sondeos geofísicos y estimaciones de parámetros hidráulicos que plantean el balance de aguas subterráneas para el cálculo de la recarga media anual, tal como se dio a conocer en el **ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LAS SUBCUENCAS DE LOS RÍOS SONORA, ZANJÓN, SAN MIGUEL, MESA DEL SERI-LA VICTORIA Y CUENCA BACOACHITO, elaborado por la Universidad de Sonora, para la Comisión Estatal del Agua (CEA) de Sonora en 2005.**

3.2. Fisiografía

El área de estudio se encuentra contenido fisiográficamente en la Provincia de la Sierra Madre Occidental; Subprovincia de Sierras y Valles del Norte, formada principalmente por sierras altas entre las cuales se localizan amplios valles paralelos con orientación preferente norte-sur y noroeste-sureste (INEGI, 2000, pp. 14).

El área de la subprovincia en territorio sonorense es de 32,688.84 km², abarca totalmente los municipios de: Cucurpe, Arizpe, Cumpas, Huásabas, Bacoachi, Banámichi, Huépac, San Felipe de Jesús, Aconchi, Baviácora, Moctezuma, Granados y San Javier; además incluye parte de Nogales, Imuris, Cananea, Fronteras, Nacozari de García, Villa Hidalgo, Opodepe, Rayón, Divisaderos, Tepache, San Pedro De la Cueva, Villa Pesqueira, Soyopa, La Colorada, Cajeme y Rosario.

Esta región está formada principalmente por sierras entre las cuales se localizan amplios valles paralelos con orientación norte-sur. La altitud de los sistemas montañosos decrece hacia el sur de tal forma que en la sierra Los Ajos, al este de Cananea, se localiza la mayor altitud, con 2,620 m; al norte de Mazocahui gran parte de las elevaciones exceden los 1000 msnm, mientras que al sur de esta población la mayoría de las cimas quedan por debajo de esa altitud. En las sierras dominan las rocas volcánicas ácidas, sin embargo, un cuerpo ígneo intrusivo aflora desde la sierra Los Locos hasta Mazatán y Nácori Grande, pasando por Mazocahui. En los valles abundan los materiales sedimentarios continentales (conglomerados del Terciario); en los ubicados al occidente fluyen los ríos San Miguel de Horcasitas y Sonora; mientras que por los valles orientales fluyen el río Moctezuma y el Bavispe, ambos afluentes del río Yaqui (Figura 7).

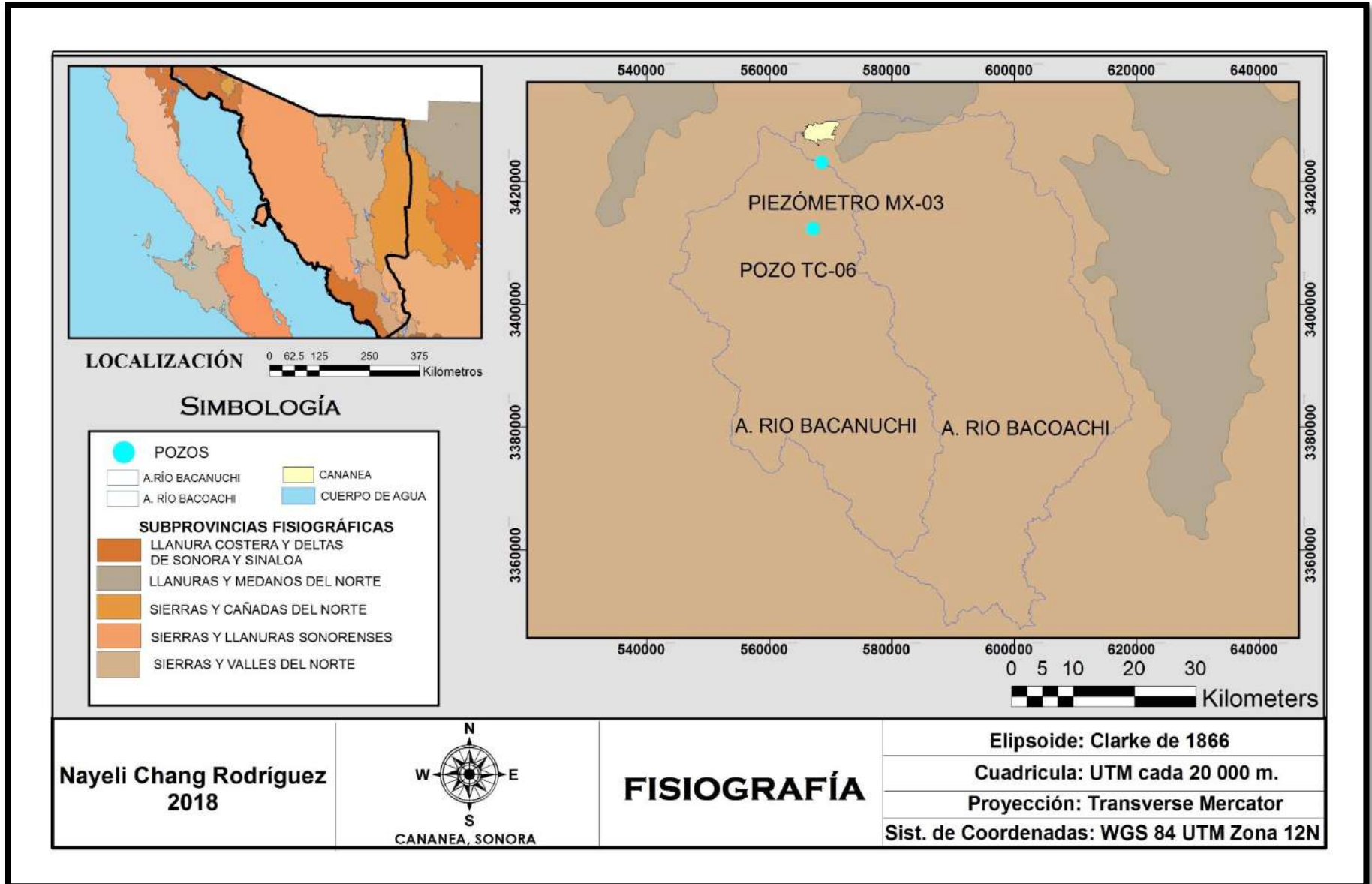


Figura 7. Provincias fisiográficas en el área de estudio.

3.3. Clima

De acuerdo a la clasificación utilizada por Köppen, modificado por E. García (1964), el clima que prevalece en la región, es el BS1kw (x'), que corresponde a clima semiseco-templado con lluvias en verano. Se caracteriza porque su temperatura media anual es de 12 a 18 °C, con una precipitación total anual entre 400 y 600 mm, el verano es cálido y en general este clima se ubica en las zonas con una altura sobre el nivel del mar entre 1,000 y 2,400 metros (Figura 8).

En la región sur de ambos acuíferos, domina el clima BS0kw(x') seco templado y BS0hw(x') seco semicálido, con invierno fresco, temperatura media anual mayor a 18 °C, régimen de lluvias en verano con porcentaje de lluvia invernal mayor a 10.2 con respecto al anual. Existen estudios climatológicos realizados en las inmediaciones del acuífero Bacoachi; específicamente en las estaciones Cananea y Arizpe, mientras que en el acuífero Bacanuchi, las estaciones climatológicas analizadas corresponden a El Fresnal, Cumeral, Magdalena, El Claro, Cucurpe, Bacanuchi y de igual forma Arizpe.

De acuerdo al análisis de las estaciones mencionadas anteriormente, el régimen de precipitación media anual para el acuífero río Bacoachi, es de 550 mm, mientras que para el acuífero río Bacanuchi es de 457 mm. En ambos casos el período de ocurrencia principal son los meses de julio y agosto. En cuanto a la evapotranspiración (definida como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa y transpiración vegetal), se han calculado valores muy cercanos a los de precipitación, por lo que no existe una recarga efectiva hacia el acuífero; la recarga por infiltración representa un volumen muy bajo.

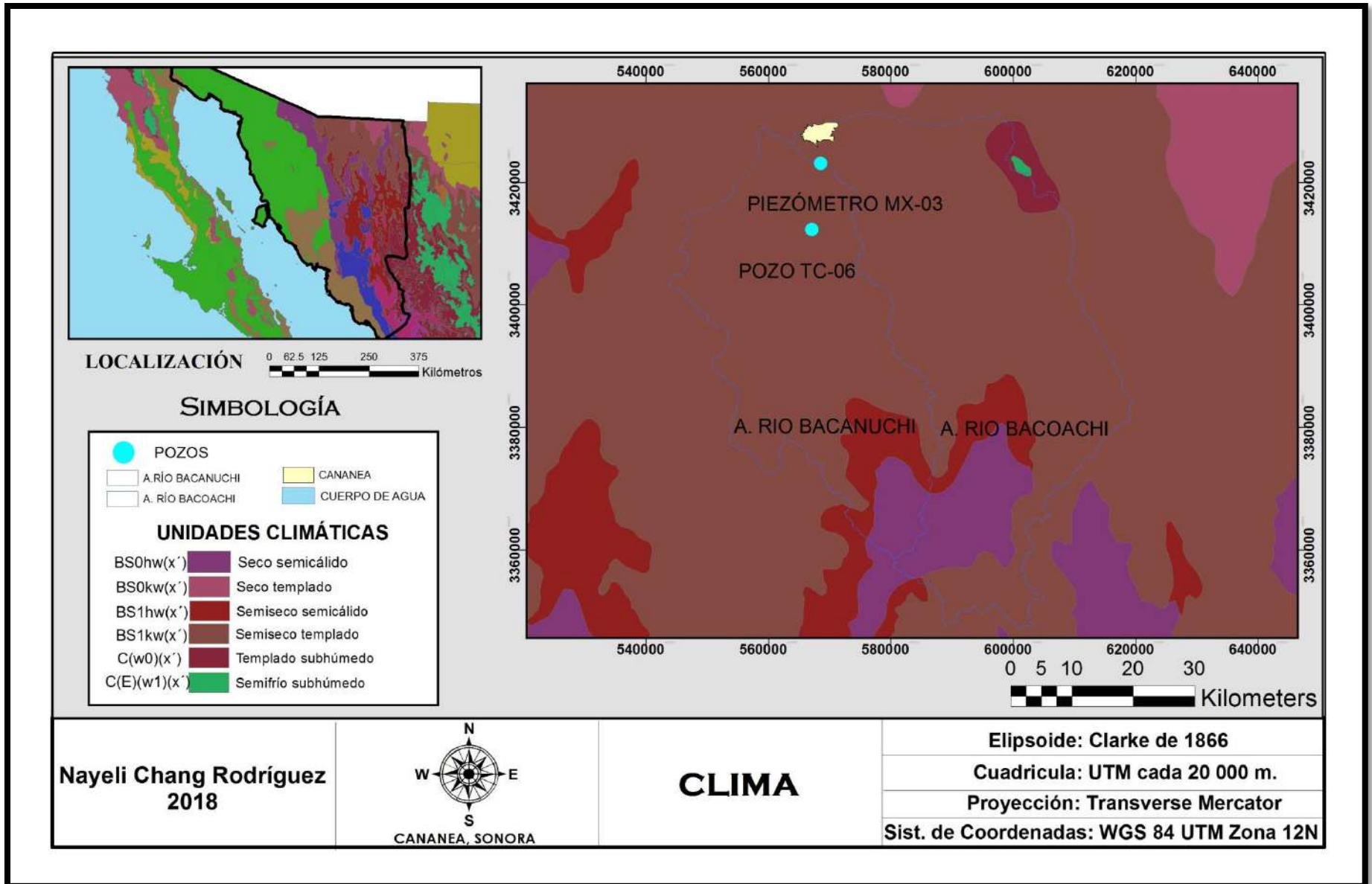


Figura 8. Clima en el área de estudio.

3.4. Hidrografía

Puesto que los pozos dentro del área de estudio cubren parte de la superficie del acuífero río Bacoachi y a su vez del acuífero río Bacanuchi, se describe a continuación la hidrografía de ambas subcuencas. Los dos acuíferos mencionados anteriormente, se encuentran ubicados en la región Hidrológica 9 denominada “Sonora Sur”, cuenca río Sonora (INEGI, 1993, pp. 62-64).

La cuenca del río Bacanuchi tiene un área de captación de 1,431 km² y su origen es en el partaguas con el río Bacoachi que es el primer afluente del río Sonora; tiene su nacimiento en las cercanías de Cananea, como producto de los escurrimientos del flanco occidental de la sierra del Manzanal, porción oriental de la sierra Papigochic y parte de la Sierra de Cananea manteniendo un caudal constante hasta su confluencia con el río Sonora. Algunos de sus arroyos tributarios mantienen un gasto constante durante el año debido a la presencia de pequeños manantiales que nacen en las sierras aledañas, además el agua de los mismos que no alcanza a llegar al cauce principal (Figura 3.3.).

El acuífero río Bacoachi tiene como corriente principal el río Sonora, que tiene un área de captación de 1,828 km² hasta el límite sur del acuífero, en la población de Arizpe. Nace a la altura de Cananea y presenta escurrimientos la mayor parte del año en algunos lugares, como en la zona norte de la región de Bacoachi, para desaparecer en otros. En los lugares en que el gasto del río se mantiene casi todo el año se tiene la presencia de manantiales de bajo caudal. Hacia la parte de final de la cuenca, en la población de Buena Vista, el río mantiene un régimen intermitente que escurre sólo en época de lluvias, mantiene un rumbo NW-SE, paralelo al río Bacanuchi, hasta llegar a la población de Bacoachi, ubicada en la parte central de la subcuenca, donde cambia el rumbo a NE-SW hasta la población de Buena Vista. A 2 km al norte de la población de Arizpe, se une con el río Bacanuchi, en el límite con el acuífero río Sonora.

El drenaje es de tipo detrítico y los almacenamientos de agua superficial principales son las presas de jales ubicadas al SE de la ciudad de Cananea, el resto de los almacenamientos superficiales son represas. Por correlación con los gastos medios diarios registrados en la estación hidrométrica El Orégano, en el municipio de Hermosillo, se concluye que durante los meses de julio, agosto y septiembre se presentan los máximos gastos en el río Sonora, en tanto que el periodo de estiaje se presenta en los meses de abril, mayo y junio principalmente.

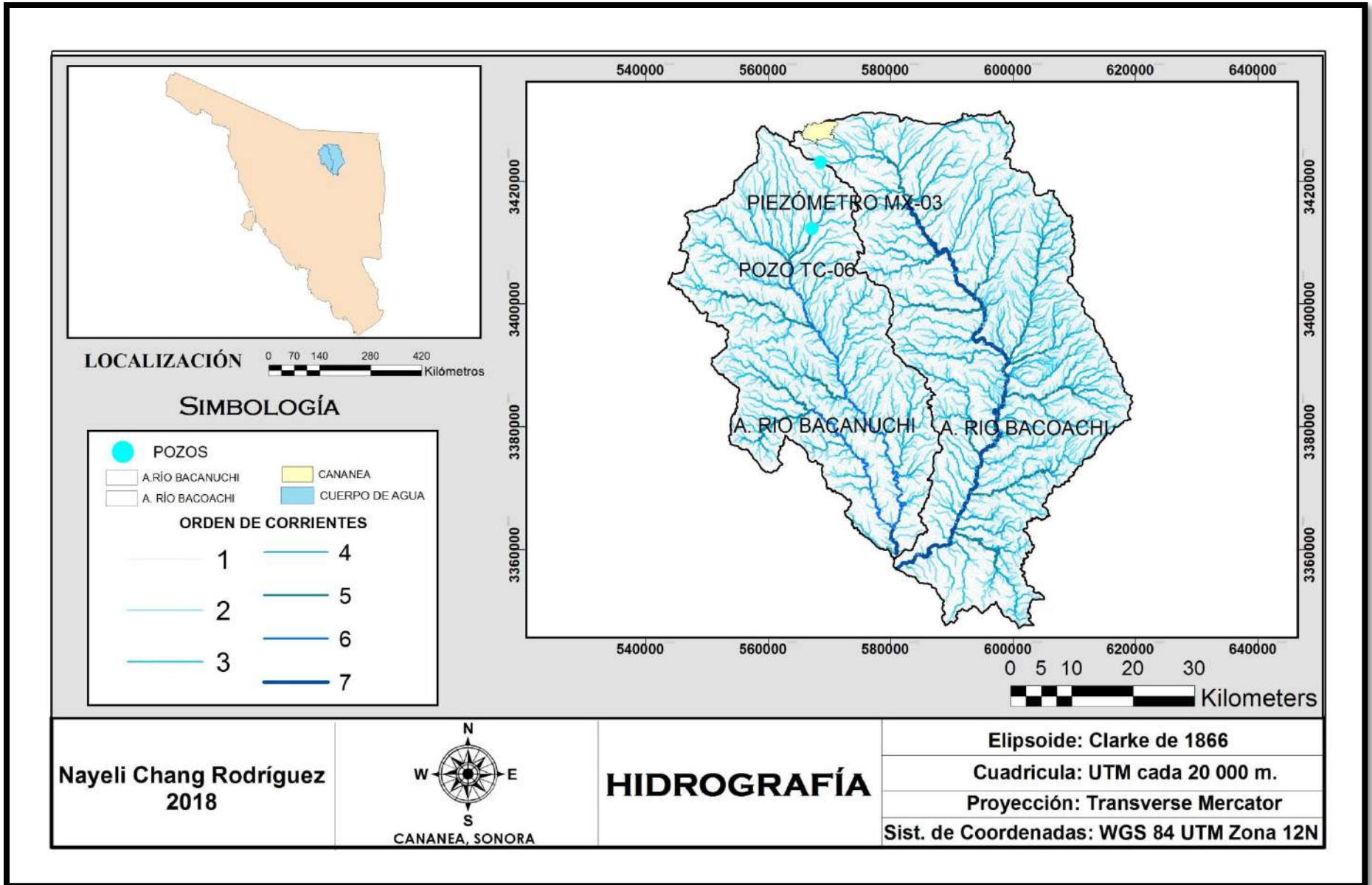


Figura 9. Hidrografía.

3.5. Geomorfología

De acuerdo a la carta de Unidades Geomorfológicas de México realizada por Lugo-Hubp, José (1990) los acuíferos se encuentran dentro de las provincias sierras sepultadas de Sonora, sierras y valles, y en la Sierra Madre Occidental; dentro de esta última, en las subprovincias de planicies y montañas residuales, así como sierras volcánicas paralelas.

Como unidad más representativa de ambos acuíferos, se encuentra un lomerío de pendiente estable formado por conglomerado polimíctico, basalto del Terciario Mioceno. En segundo lugar, se ubican montañas altas de pendiente metaestable, formadas por roca volcánica intermedia, volcánica ácida del Cretácico superior, mientras que en tercer lugar se localizan montañas altas de pendientes inestables de origen volcánico ácido a intermedio del Terciario inferior. Las demás unidades están conformadas por montañas de pendiente metaestable, lomeríos y planicies aluviales con actividad antrópica.

La región se encuentra ubicada en la vertiente del Pacífico y está drenada por corrientes intermitentes dispuestas en patrones de drenaje integrado. Los valles presentan una etapa de rejuvenecimiento, evidenciado por la erosión de los depósitos del Paleógeno-Neógeno y la presencia de terrazas aluviales recientes.

3.6. Estratigrafía

Se tienen dos áreas de estudio; piezómetro MX-03 y pozo de producción TC-06, por lo cual se muestra a continuación una breve descripción de la estratigrafía de ambos sitios

3.6.1. Estratigrafía piezómetro MX-03

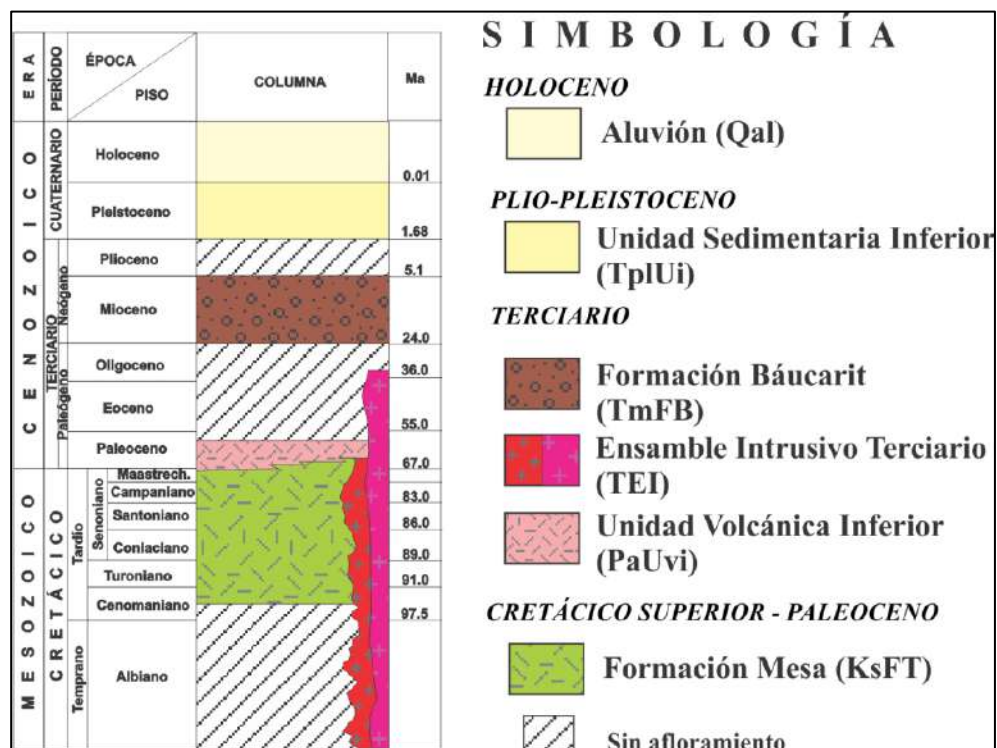


Figura 10. Columna estratigráfica piezómetro MX-03. Por IDEAS, (2017).

- **Formaci3n Mesa (KsFT):** representa un conjunto de rocas volc3nicas de composici3n andes3tica constituidas por tobas, aglomerados y flujos que se intercalan con conglomerados y areniscas. En estos afloramientos, la andesita es de color gris-verdoso, con textura de porf3dica a afan3tica y una composici3n mineral dominada por oligoclasa-andesina, mica alterada, apatito, 3xidos de fierro y minerales de alteraci3n como epidota, minerales arcillosos, sericita, clorita, hematita y calcita. La toba andes3tica es de color gris-verdoso y gris-claro con tonos morados, de textura afan3tica-porf3dica, con estratificaci3n mediana a gruesa e intercalada con arenisca tob3cea y aglomerados.

- **Unidad Volcánica Inferior (PaUvi):** la unidad está representada por rocas volcánicas como riolitas y tobas riódacíticas. La riolita es de color gris claro a crema y presenta una textura afanítica, donde eventualmente se puede observar algunos minerales como cuarzo y feldespatos; por su parte la toba riódacítica es de color gris claro a gris rosado.
- **Ensamble Intrusivo Terciario (TEI):** serie de intrusiones que se encuentra afectando a gran parte de la litología del área de estudio, y cuyas edades se tienen entre el Paleoceno y el Oligoceno. Hacia la porción oeste del área estudiada se tienen afloramientos de un pórfido cuarzomonzónico de color gris verdoso y fenocristales de feldespato y ferromagnesianos, el cual presenta alteración propilítica y sericítica.
- **Formación Báucarit (TmFB):** dentro del área de estudio solo se tiene un afloramiento local en la porción sur, donde la formación está representada en la base por el afloramiento de un conglomerado con estratificación gruesa a mediana que se tiene principalmente en la esquina suroeste, el cual se intercala con areniscas de color pardo claro a crema (TmCgp-Ar). Este conglomerado está moderadamente clasificado, con clastos de subangulosos a subredondeados de hasta 20 cm, y presenta una composición de clastos dominada por fragmentos de andesita, riolita, toba riolítica, toba andesítica, andesita porfídica, traquiandesita y riódacita.
- **Unidad Sedimentaria Inferior (TplUi):** esta unidad incluye una secuencia sedimentaria detrítica heterogénea de gravas polimícticas que va desde pobremente consolidadas a no consolidadas, constituida por clastos redondeados (en su mayoría) de diferente composición. Dentro del área de estudio presenta una distribución muy amplia y representa en gran medida, la unidad más importante desde el punto de vista hidrogeológico.
- **Aluvión (Qal):** estos materiales que se consideran del Cuaternario se encuentran principalmente cubriendo los cauces de ríos y arroyos. Consisten de material suelto constituido por algunos cantos, gravas, arena, limo y arcilla, como resultado de la erosión de rocas preexistentes.

3.6.2. Estratigrafía pozo productivo TC-06

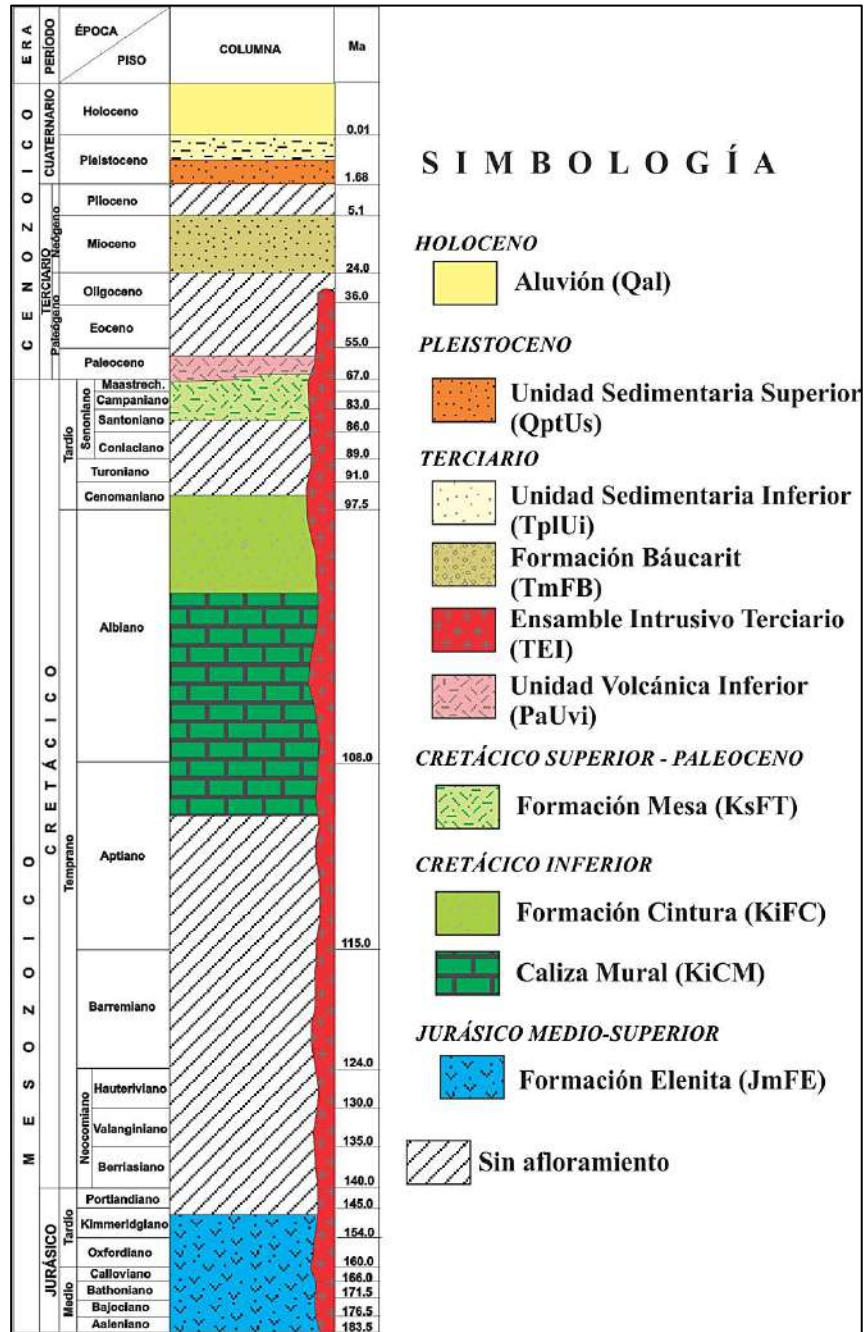


Figura 11. Columna estratigráfica pozo de producción TC-06. Por IDEAS, (2017).

- **Formación Elenita (JmFE):** secuencia vulcanosedimentaria que aflora en la sierra Elenita, constituida por intercalación de flujos volcánicos riolíticos y areniscas vulcanoclásticas, cuarcitas y grawackas. Litológicamente está presente como una riolita de color crema de textura fanerítica gruesa a porfídica muy fracturada, con estructura masiva y compacta. Su composición mineral está dominada por cuarzo, muy comúnmente en forma de “ojos”, feldespato y algunos ferromagnesianos.
- **Caliza Mural (KICM):** La Caliza Mural, como parte del Grupo Bisbee, presenta un afloramiento aislado en la porción sureste del área estudiada, en el cual está constituida por estratos de calizas fosilíferas con estratificación delgada en la base y gruesa hacia la cima; contiene una variedad de fauna fósil, sin embargo, sobresale el foraminífero *Orbitolina Texana Roemer*. Localmente se tienen intercalaciones de capas de arenisca y lutita de estratificación delgada.
- **Formación Cintura (KIFM):** esta unidad se encuentra en la cima del Grupo Bisbee en Arizona, en el área de estudio, está caracterizada por una alternancia monótona de capas de arenisca y lutitas, con locales intercalaciones de estratos delgados a medios de calizas. Una característica de esta secuencia detrítica es la coloración gris claro a gris rojizo que presenta al intemperismo, así como la presencia de estratificación cruzada y rizaduras de corriente en las areniscas, así como también restos de troncos silicificados.
- **Formación Mesa (KsFT):** representa un conjunto de rocas volcánicas de composición andesítica constituidas por tobas, aglomerados y flujos que se intercalan con conglomerados y areniscas. Dentro del área de estudio, esta unidad se tiene aflorando principalmente hacia el límite oriental, con afloramientos locales en la porción centro-norte y centro-oeste. En estos afloramientos, la andesita es de color gris-verdoso, con textura de porfídica a afanítica y una composición mineral dominada por oligoclasa-andesina, mica alterada, apatito, óxidos de fierro y minerales de alteración como epidota, minerales arcillosos, sericita, clorita, hematita y calcita. La toba andesítica es de color gris-verdoso y gris-claro con tonos morados, de textura afanítica-porfídica, con estratificación mediana a gruesa e intercalada con arenisca tobácea y aglomerados.

El aglomerado andesítico presenta una coloración gris-verdosa, con clastos de varios centímetros de diámetro de rocas de composición intermedia en una matriz tobácea. El conglomerado polimíctico presenta una coloración gris a café-verdosa, con clastos subangulosos y subredondeados de caliza gris claro-crema, toba andesítica, andesita y riolita porfídica en una matriz arenosa, cuyos clastos varían desde el tamaño de grava hasta bloque. La arenisca se presenta en estratos medianos intercalados con las rocas anteriormente descritas, son de grano fino-medio bien clasificado, de color gris-violeta y café-amarillento con tonos verdosos. Toda esta secuencia presenta los efectos de alteración hidrotermal como propilitización, oxidación argilización y sericitización. El espesor estimado para esta unidad es de 1500 m por el Servicio Geológico Mexicano (2008). La Formación Mesa se encuentra cubriendo discordantemente a la Formación Elenita, y es intrusionada por los plutones laramídicos; siendo cubiertas discordantemente por la secuencia volcanosedimentaria del Mioceno y sedimentos más jóvenes.

- **Unidad Volcánica Inferior (PaUvi):** está representada por rocas volcánicas como riolitas y tobas riódacíticas. La riolita es de color gris claro a crema y presenta una textura afanítica, donde eventualmente se puede observar algunos minerales como cuarzo y feldespatos; por su parte la toba riódacítica es de color gris claro a gris rosado, y petrográficamente está constituida de oligoclasa-andesina, ortoclasa-sanidino, cuarzo, biotita, y fragmentos de roca andesítica, con abundantes hilillos de cuarzo (Servicio Geológico Mexicano, 2003).
- **Ensamble Intrusivo Terciario (TEI):** esta unidad litodémica se propone para incluir una serie de intrusiones que se encuentra afectando a gran parte de la litología del área de estudio y cuyas edades se tienen entre el Paleoceno y el Oligoceno. Uno de estos cuerpos intrusivos aflora en la porción norte del área de estudio, como una roca de color gris oscuro con abundantes ferromagnesianos, textura fanerítica y muy fracturada (TpaD). En la esquina sureste del área se tiene el afloramiento en forma de stock que intrusiona a la Formación Mesa, de un pórfido cuarzomonzónico (TepqMz) de color gris verdoso y fenocristales de feldespato y ferromagnesianos, el cual presenta alteración propilítica y sericitica. El Servicio Geológico Mexicano (2003) considera que este tipo de rocas están muy relacionadas a la mineralización que se tiene dentro del distrito minero.

Otra roca intrusiva que se considera dentro de esta unidad se tiene aflorando en la porción centro norte del área, como un cuerpo en forma de apófisis que intrusión a la Formación Mesa, y cuya composición mineral varía de andesita a dacita con una textura porfídica (ToPA-DA).

- **Formación Báucarit (TmFB):** dentro del área de estudio, la formación está representada en la base por el afloramiento de un conglomerado con estratificación gruesa a mediana que se tiene principalmente en la esquina suroeste, el cual se intercala con areniscas de color pardo claro a crema (TmCgp-Ar). Este conglomerado está moderadamente clasificado, con clastos de subangulosos a subredondeados de hasta 20 cm, y presenta una composición de clastos dominada por fragmentos de andesita, riolita, toba riolítica, toba andesítica, andesita porfídica, traquiandesita y riodacita. En la cima, esta secuencia detrítica presenta intercalaciones de andesitas y basaltos (TmA-B) producto de una actividad volcánica fisural, lo cual se tiene dentro del área estudio en las porciones centro-oeste y suroeste.
- **Unidad Sedimentaria Inferior (TplUi):** secuencia sedimentaria detrítica heterogénea de gravas polimícticas pobremente consolidadas y no consolidadas, constituida por clastos principalmente redondeados de fragmentos de diferente de composición, dependiendo del área de procedencia. Localmente se encuentran capas cementadas con una matriz arenosa, y en general se presentan intercalados con arenas y con una expresión morfológica de llanuras extensas y lomeríos suaves. Dentro del área de estudio presenta una distribución muy amplia y representa en gran medida, la unidad más importante desde el punto de vista hidrogeológico a profundidad.
- **Unidad Detrítica Sedimentaria Superior (QpUs):** consiste de una secuencia de horizontes detríticos no consolidados y de granulometría media a fina. Su distribución dentro del área estudiada está asociada a partes topográficamente planas y valles amplios, como el que se observa en la porción central. Litología constituida por arenas finas, limos y arcillas no consolidados, integrados por fragmentos y detritos de rocas preexistentes, los cuales se depositaron rellenando partes topográficamente irregulares y bajas, con espesores máximos de 15 metros.

- **Aluvión (Qal):** estos materiales que se consideran del Cuaternario se encuentran principalmente cubriendo los cauces de ríos y arroyos. Consisten de material suelto constituido por algunos cantos, gravas, arena, limo y arcilla, como resultado de la erosión de rocas preexistentes, que a su vez son transportados por las corrientes fluviales.

4. EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

La exploración geofísica comienza con el análisis de las unidades estratigráficas presentes en el área de estudio. En el caso del piezómetro MX-03, se tienen secuencias sedimentarias correspondientes a la Formación Báucarit, mientras que el pozo TC-06 se ubica dentro de los parámetros de la Unidad Sedimentaria Inferior.

La información geológica del sitio, así como las estructuras regionales, son interpretadas y procesadas a partir de datos magnetométricos capaces de mostrar cuerpos cercanos a la superficie como tuberías, o bien estructuras más profundas dependiendo de la resolución y la extensión del levantamiento. Los métodos y perfiles mostrados a continuación, corresponden a la identificación del piezómetro MX-03 como “sitio propuesto” para exploración directa, sin embargo, la metodología para el análisis y procesamiento de la información, es el mismo que en el caso del pozo de producción TC-06.

4.1. Método electromagnético.

Con el método electromagnético aplicado (TEM), se pretende mostrar una caracterización resistiva del subsuelo. Debido a la gran resolución vertical que se obtiene con esta técnica, en los perfiles resistivos es posible observar las heterogeneidades (zonas anómalas) debidas a estructuras geológicas, cambios de facies y fracturamiento de la roca, donde además la presencia del agua influye en el valor medido, provocando cambios importantes en la resistividad (que es el parámetro experimental de campo que se mide).

Particularmente para este proyecto, la técnica del TEM (sondeo transitorio electromagnético), consistió en utilizar una espira o bobina que está construida por un cable en forma de cuadro con dimensiones de 150 x 150 m (área de la bobina 22,500 m²), con el arreglo denominado "Loop coincidente" (Figura 11), es decir donde únicamente se utiliza una bobina, la cual actúa en ciertos instantes de tiempo como transmisora de la señal y en otros es receptora, con una resistencia de 4.3 ohms en el circuito, para lo cual utilizó un cable de fabricación canadiense de 110 hilos.

Con estas características del arreglo se logró una intensidad de corriente que variaba entre 3 y 4 amperes, permitiendo una profundidad de investigación teórica de 500 m en promedio. Una de las desventajas de estos arreglos es que la porción más sub-superficial pierde resolución.

Una vez obtenida y verificada la información de campo, se inició el trabajo de gabinete que básicamente consiste en:

- 1) La corrección de los datos geofísicos.
- 2) La elaboración de modelos.
- 3) La configuración de los perfiles de resistividad.
- 4) La interpretación de las unidades hidroestratigráficas y del modelo geofísico.

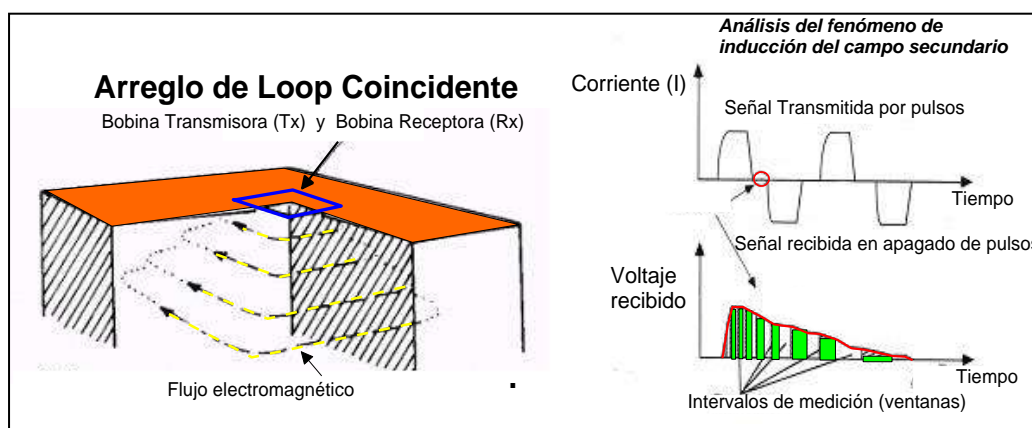


Figura 11. Arreglo de *loop* coincidente utilizado en los sondeos. Por www.langeoinstrument.com.

4.2. Levantamiento geofísico piezómetro MX-03 (TZ2-03).

Se realizaron un total de 24 TEM en el área denominada “Zona 2 – predio 24”, con el principal objetivo de determinar la presencia de estructuras mayores que estén afectando al macizo rocoso, interpretar el grado de fracturamiento que eventualmente puedan presentar las rocas localmente en el subsuelo, identificando con esto zonas que puedan ser conductos de flujo subterráneo de agua (Figura 12).

En este contexto, las diferentes unidades resistivas que se identifican en los perfiles son interpretadas en función del grado de fracturamiento que presenta la roca, asumiendo que: 1) el macizo rocoso consiste de manera general en un complejo ígneo dominado por rocas volcánicas (intermedias) e intrusivas (graníticas); y 2) que las zonas donde se tenga una densidad de fracturas relativamente baja, tendrán una resistividad alta ($>100 \Omega \cdot m$), mientras que aquellas de resistividad baja ($<30 \Omega \cdot m$) están indicando zonas de densidad de fracturamiento alto con probabilidades altas de presentar una zona con saturación de agua y/o una con alto contenido de minerales. Lo que el desarrollo e interpretación de los TEM ofrece como resultado cuantitativo únicamente son valores de resistividad del subsuelo, y no es posible obtener valores de otros parámetros tales como porosidad de la roca, o contenido mineralógico; aun así, se pueden realizar inferencias y modelos de ciertas condiciones geológicas y calidad de agua.

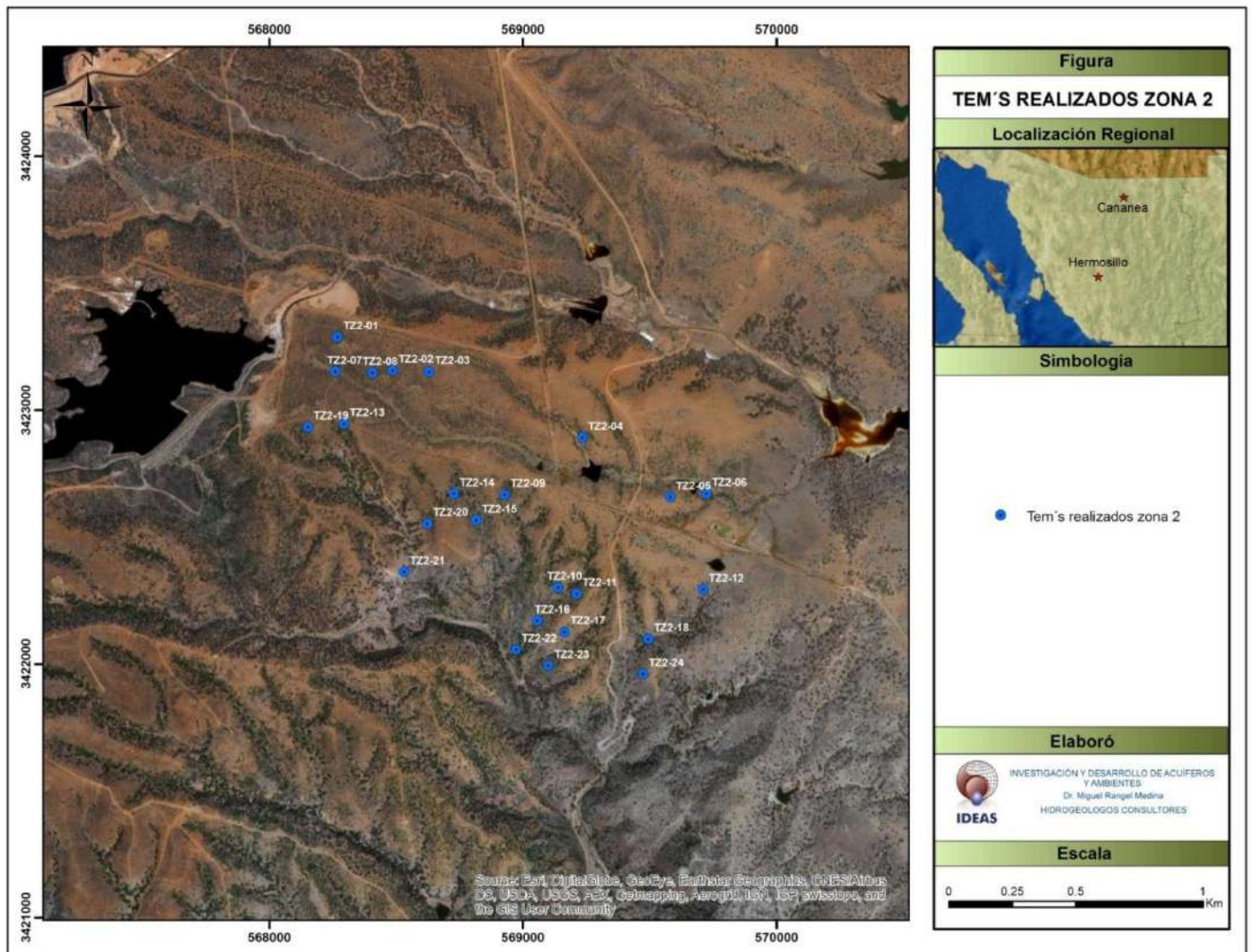


Figura 12. Localización de la zona 2 (predio 24). Por IDEAS, (2017).

De acuerdo a las resistividades obtenidas en dicha zona, se identificaron un total de 5 unidades resistivas las cuales se relacionaron al grado de fracturamiento, integrando una tabla de resistividades y su interpretación (Figura 13).

TABLA DE RESISTIVIDAD		
UNIDAD	INTERVALO RESISTIVO	INTEPRETACIÓN GENÉRICA
	U1	Relleno superficial, suelo y materiales no saturados
U2	15 a 30	Zona alto fracturamiento
U3	30 a 60	Roca con fracturamiento moderado
U4	60 a 100	Roca con fracturamiento bajo
U5	> 100	Roca poco alterada o sana
Nota: Se presenta una asociación litológica general que considera la relación típica entre la resistividad, tipo de fracturamiento en la roca y los materiales granulares. Puede presentarse excepciones.		

Figura 13. Unidades resistivas interpretadas dentro de la zona 2 (predio 24). Por IDEAS, (2017).

- **Unidad U1:** es la más superficial en la mayoría de los perfiles, presentándose con un espesor variable y con rangos de resistividad muy que van desde los 21 $\Omega \cdot m$ hasta mayores de 100 $\Omega \cdot m$. Representa unidades de suelo y sedimentos de granulometría muy variada, generalmente no consolidados ni saturados.
- **Unidad U2:** esta unidad se establece como una zona de fracturamiento alto al registrar un intervalo de resistividad entre 15 y 30 $\Omega \cdot m$. Es importante señalar que los valores más bajos de esta unidad (<20 $\Omega \cdot m$) si se encuentran cercanos a la influencia de un cuerpo intrusivo en superficie o en el subsuelo, muy probablemente representen áreas de alta alteración y/o mineralización.
- **Unidad U3:** esta unidad representa una roca con fracturamiento moderado, asociándose a un rango de resistividad de entre 30 a 60 $\Omega \cdot m$.
- **Unidad U4:** con un intervalo de resistividades entre 60 y 100 $\Omega \cdot m$, esta unidad resistiva representa la zona donde la roca se presenta con un fracturamiento bajo.
- **Unidad U5:** se trata de la roca sana o sin alteración en el subsuelo, ya que presenta resistividades muy elevadas, con valores superiores a 100 $\Omega \cdot m$.

Una vez identificados los puntos de interrupción de las anomalías resistivas en las estructuras, se describen perfiles de resistividad que muestran las zonas de mayor interés para la propuesta de sitios de perforación, así como también los perfiles geoelectricos derivados de la interpretación de éstos.

Para la localización de los sitios de medición se utilizó un equipo GPS marca GARMIN, el cual proporciona las coordenadas geográficas (X, Y) y una elevación con un margen de error aceptable para cada sitio de medición (Tabla 3).

Tabla 3. Coordenadas de los Sondeos Electromagnéticos realizados zona 2. Por IDEAS, (2017).

COORDENADAS WGS 84 ZONA 12							
ID	X	Y	Z	ID	X	Y	Z
TZ2-01	568270.48	3423287.75	1552.00	TZ2-13	568295.11	3422945.17	1542.00
TZ2-02	568487.13	3423156.15	1547.00	TZ2-14	568728.39	3422669.71	1526.00
TZ2-03	568630.58	3423150.73	1545.00	TZ2-15	568816.54	3422565.68	1515.00
TZ2-04	569235.20	3422891.78	1527.00	TZ2-16	569057.44	3422170.10	1486.00
TZ2-05	569581.60	3422657.25	1520.00	TZ2-17	569165.20	3422126.32	1494.00
TZ2-06	569723.25	3422670.19	1515.00	TZ2-18	569494.38	3422097.40	1496.00
TZ2-07	568261.71	3423151.76	1549.00	TZ2-19	568153.66	3422932.58	1546.00
TZ2-08	568407.77	3423146.47	1547.00	TZ2-20	568623.92	3422552.75	1520.00
TZ2-09	568929.30	3422666.17	1522.00	TZ2-21	568533.01	3422362.15	1501.00
TZ2-10	569138.31	3422300.66	1499.00	TZ2-22	568973.17	3422055.49	1471.00
TZ2-11	569213.14	3422276.20	1506.00	TZ2-23	569101.50	3421992.87	1480.00
TZ2-12	569711.39	3422293.60	1510.00	TZ2-24	569474.27	3421960.27	1496.00

4.2.1. Perfil de resistividad NW-SE 04

A partir del análisis de un conjunto de TEM se construye un perfil de resistividad. A continuación, se muestra el perfil que incluye el TEM TZ2-03 (correspondiente al piezómetro MX-03) además incluye los TEM: TZ2-09, TZ2-11 y TZ2-18. En general tiene una orientación W-E y una longitud de 1275 m (Figura 14). La profundidad máxima de estudio alcanzada fue de 440 m en el TEM TZ2-09. La unidad U1 se encuentra como un cuerpo continuo a lo largo de la porción más superficial del perfil, con un espesor de 10 m y un rango variable de resistividades entre 24 y 38 $\Omega \cdot m$.

La unidad U2 fue identificada de manera importante en los TEM que limitan este perfil, en el TEM TZ2-03 está como una zona de 110 m de espesor con resistividades entre los 16 y 27 $\Omega \cdot m$, mientras que en el TEM TZ2-18 se presentan dos intervalos; uno a 20 m de profundidad con un espesor de 60 m y resistividades entre 14 y 26 $\Omega \cdot m$ y otro a una profundidad de 200 m con 150 m de espesor y resistividades menores de entre 7 y 23 $\Omega \cdot m$. En los TEM restantes de este perfil también se identificó esta unidad, sin embargo, los espesores de ésta no sobrepasan los 20 m.

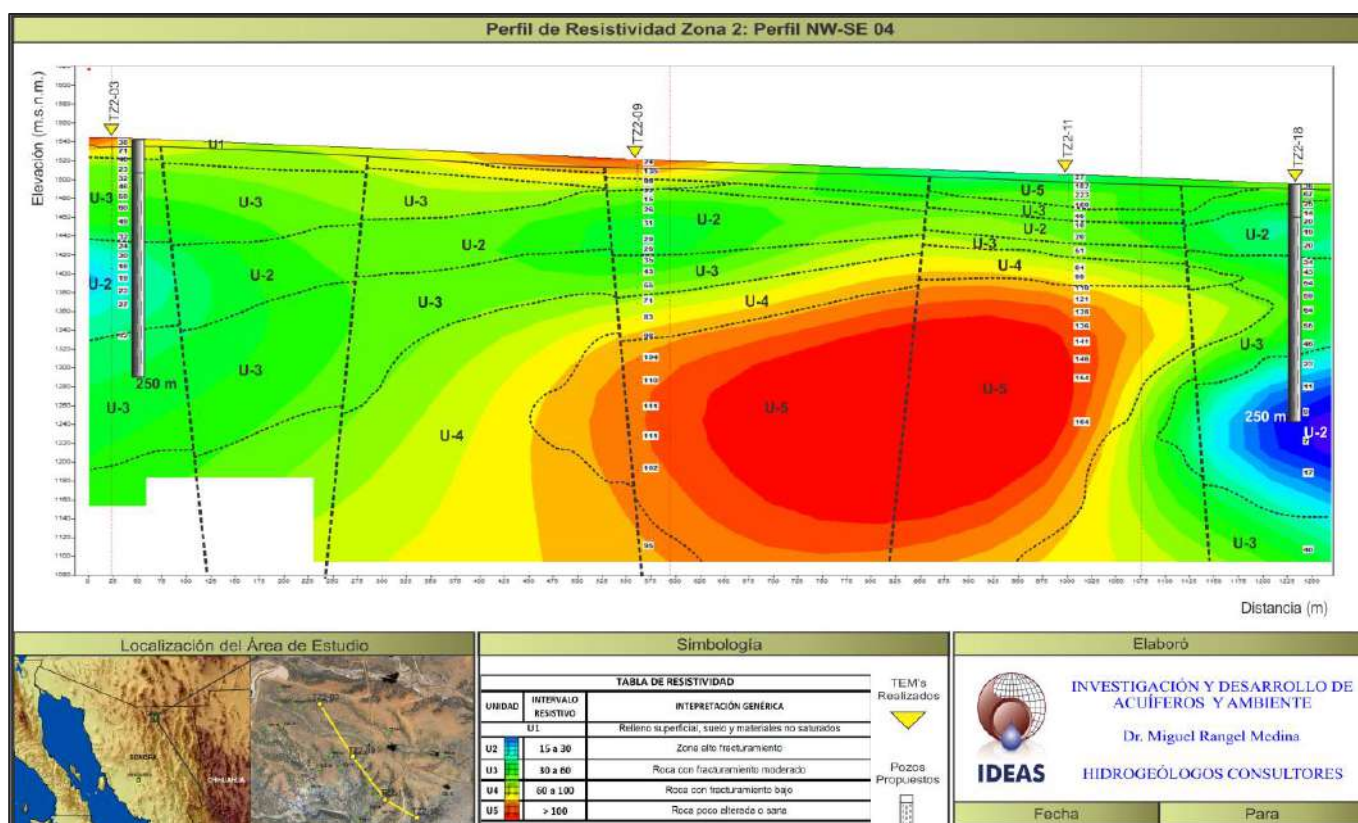


Figura 14. Perfil de Resistividad NW-SE 04 de la Zona 2. Por IDEAS, (2017).

La unidad U3 presenta un rango de resistividad entre 32 y 60 $\Omega \cdot m$ y se identificó a profundidades medias y someras en todo este perfil. El espesor mayor se tiene en el TEM TZ2-03 donde alcanza 130 m, mientras que hacia el sureste esta capa resistiva se adelgaza hasta los 20 m de espesor en la porción central, volviendo a alcanzar más de 100 m en el límite sureste (TEM TZ2-18). La unidad U4 fue identificada solo en los TEM centrales (TZ2-09 y TZ2-11) como una capa de resistividades entre los 71 y 99 $\Omega \cdot m$, con un espesor promedio de 40 m.

La unidad U5 también se identificó principalmente en los TEM TZ2-09 y TZ2-11, donde se caracteriza por resistividades mayores a los $100 \Omega \cdot m$ y llegan hasta los $164 \Omega \cdot m$, con un espesor mayor a los 100 m en ambos TEM.

4.2.2. Perfil geoelectrico NW-SE 04

A partir de los resultados obtenidos con el levantamiento de los TEM en la Zona 2 (predio 24) se interpretaron varios perfiles geoelectricos con el objetivo de identificar y determinar la distribución espacial y geométrica de las diferentes unidades geoelectricas interpretadas. Este perfil geoelectrico fue construido a partir del análisis de 4 TEM (TZ2-03, TZ2-09, TZ2-11 y TZ2-18), tiene una orientación general W-E y una longitud de 1275 m (Figura 15). La profundidad máxima de estudio alcanzada fue de 440 m en el TEM TZ2-09.

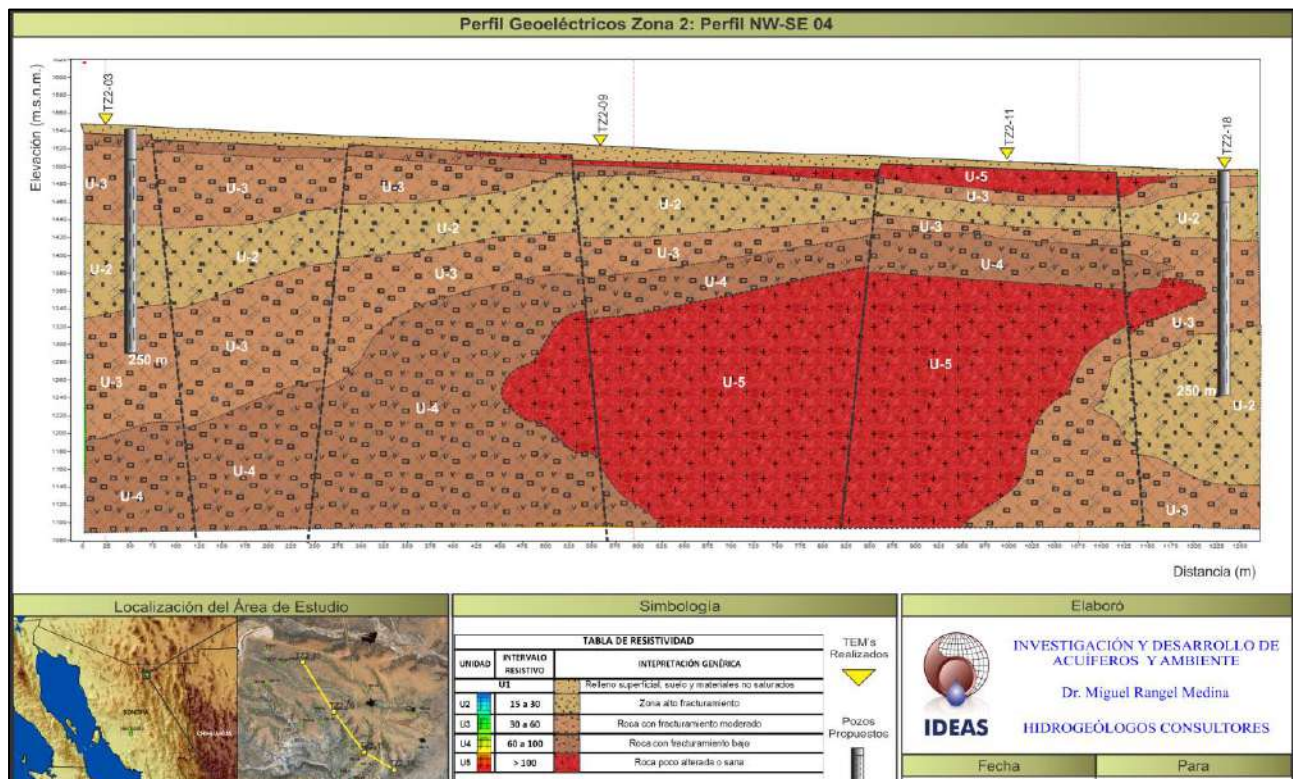


Figura 15. Perfil geoelectrico NW-SE 04 de la Zona 2. Por IDEAS, (2017).

La interpretación geoelectrica de este perfil muestra un basamento rocoso que en la porción central presenta un grado de menor fracturamiento, ya que en ésta dominan las resistividades altas de las unidades U4 y U5, mientras que, hacia los límites noroeste y sureste, dicho fracturamiento se incrementa asociado seguramente a discontinuidades mayores.

Estas últimas zonas son las que presentan el mayor atractivo desde el punto hidrogeológico, por lo que son los TEM que las representan, los sitios propuestos para la perforación directa.

4.2.3. Sitios propuestos

Una vez concluido el análisis anterior, se da paso a la propuesta de sitios para la exploración directa (piezómetros), posteriormente y en caso de obtener resultados satisfactorios, se procede a iniciar la perforación para pozos de producción con un diámetro mayor. Los resultados obtenidos deben integrarse al modelo hidrogeológico para mantenerse actualizados (Figura 16).

Tabla 4. Coordenadas de sitios propuestos para la Zona2 (Predio 24). Por IDEAS, (2017).

OPCION 1				
ID	POZO	X	Y	Z
TZ2-21	1	568533.01	3422362.15	1501.00
TZ2-14	2	568728.39	3422669.71	1526.00
TZ2-03	3	568630.58	3423150.73	1545.00
TZ2-05	4	569581.60	3422657.25	1520.00
TZ2-04	5	569235.20	3422891.78	1527.00
OPCION 2				
TZ2-12	6	569711.39	3422293.60	1510.00
TZ2-24	7	569474.27	3421960.27	1496.00
TZ2-18	8	569494.38	3422097.40	1496.00

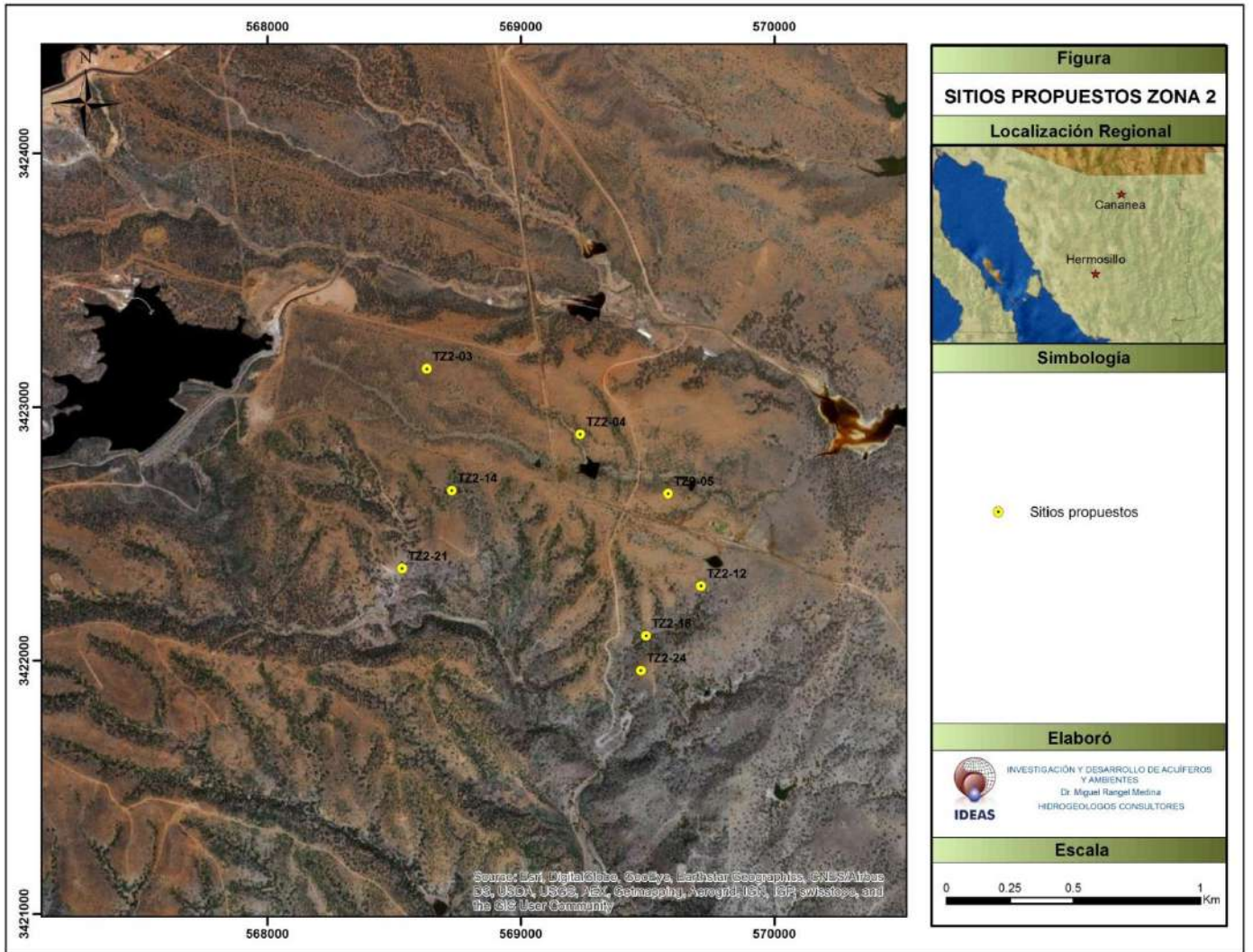


Figura 16. Localización de sitios propuestos para la zona 2 predio 24. Por IDEAS, (2017).

4.3. Levantamiento geofísico pozo de producción TC-06.

La metodología para el levantamiento geofísico es la misma que en el apartado anterior, por lo que a continuación se describen las unidades resistivas encontradas en el área de estudio del piezómetro TC-06 el cual, posteriormente, dio paso al pozo productivo TC-06.

Se realizaron un total de 10 TEM (Figura 17), en el área de estudio y, una vez hecho el tratamiento de los datos, se obtuvieron las características resistivas del sitio en el subsuelo, permitiendo una profundidad de observación de 500 m.

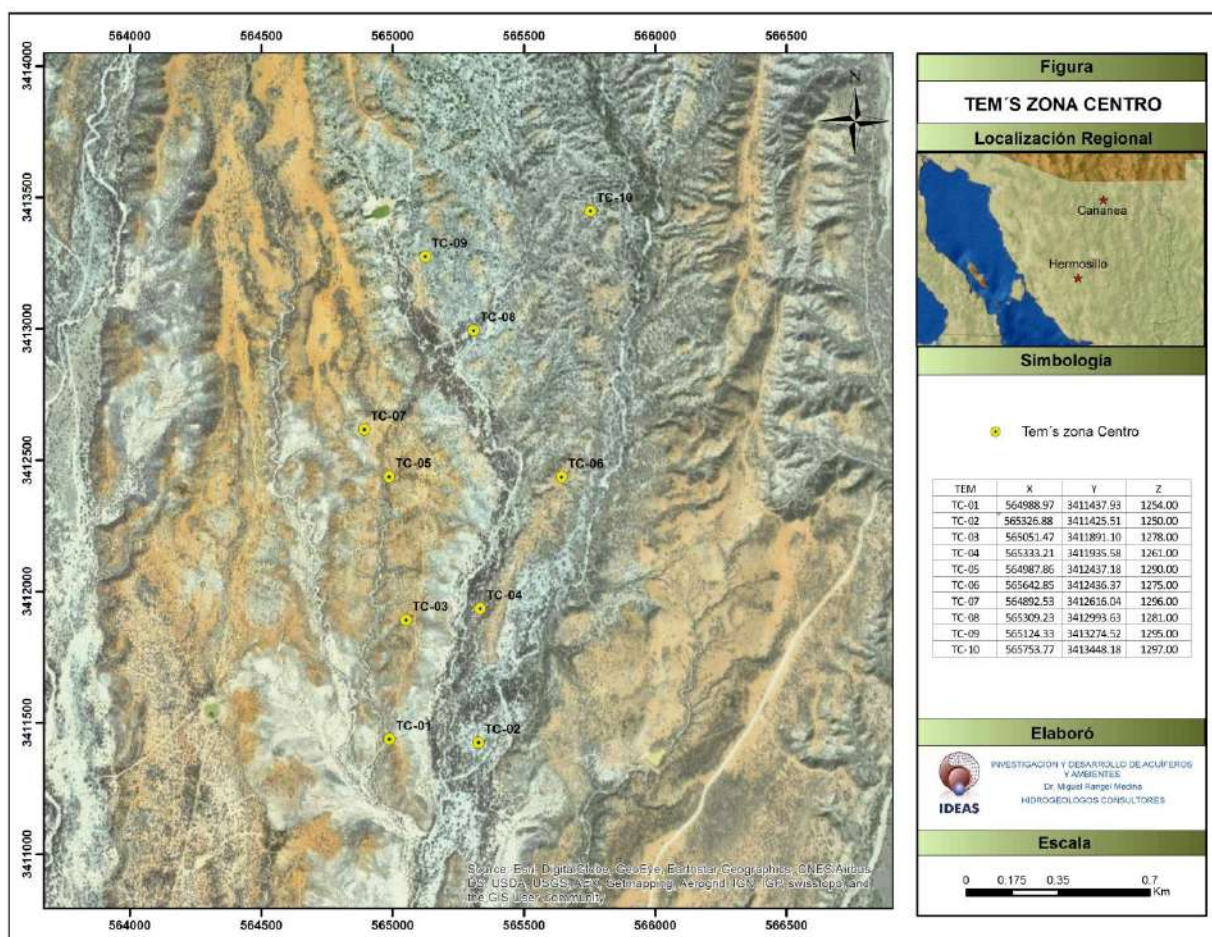


Figura 17. Localización de Tem en zona centro. Por IDEAS, (2017).

La distribución de resistividades obtenidas en el subsuelo dentro de la Zona Centro, permiten identificar un total de 3 unidades resistivas, algunas de las cuales presentan rangos de variación internos, por lo que a su vez se delimitaron varias divisiones dentro de las primeras (Figura 18).






TABLA GEOELÉCTRICA ZONA CENTRO		
UNIDAD	INTERVALO RESISTIVO	CARACTERÍSTICAS LITOLÓGICAS
U1	Variable	Relleno superficial, suelo y materiales no saturados
U2	a  1 a 10	Limo y arcillas
	b  10 a 20	Arena y arcillas
	c  20 a 36	Gravas arenosa
U3	a  36 a 40	Báucarit
	b  40 a 80	Volcánica cretácicas
	c  >80	Intrusivo
	d  1 a 12	Zona rocosa fracturada
Nota: Se presenta una asociación litológica general que considera la relación típica entre la resistividad, tipo de fracturamiento en la roca y los materiales granulares. Puede presentarse excepciones.		

Figura 18. Unidades resistivas interpretadas dentro de la zona centro. Por IDEAS, (2017).

- **Unidad U1:** Representa las resistividades más sub-superficiales en la mayoría de los perfiles, tiene un espesor variable y sus rangos de resistividad que van desde los $5 \Omega \cdot m$ hasta mayores de $100 \Omega \cdot m$. Representa unidades de suelo y sedimentos de granulometría muy variada, generalmente no consolidados ni saturados
- **Unidad U2:** Esta unidad identifica al relleno sedimentario no consolidado de cuencas extensionales en la región, y representa el acuífero granular de la zona. Con base a las condiciones resistivas y su eventual asociación a la granulometría de los sedimentos, esta unidad se dividió en 3 sub-unidades
 - o **sub-unidad U2a:** se relaciona a secuencias dominadas por limos y arcillas que presentan resistividades muy bajas, generalmente menor a los $10 \Omega \cdot m$;
 - o **sub-unidad U2b:** interpretada como una intercalación de sedimentos detríticos caracterizados por arenas y lodos, los cuales se tienen con un rango de resistividad entre 10 y $20 \Omega \cdot m$
 - o **sub-unidad U2c:** representa paquetes de sedimentos predominantemente areno-gravosos cuyas resistividades están entre 20 y $36 \Omega \cdot m$.
- **Unidad U3:** Es la unidad que presenta las resistividades más altas dentro del área y se asocia al basamento rocoso de la cuenca, caracterizado por una secuencia volcanosedimentaria intrusionada por cuerpos ígneos del Cretácico–Terciario, cubierta discordantemente por la unidad detrítica de la Formación Báucarit. Esta unidad fue dividida en 4 sub-unidades.

- **sub-unidad U3a:** presenta un rango de resistividades entre 36 y 40 $\Omega \cdot m$, y se interpreta que corresponde la secuencia conglomerática de la Formación Báucarit;
- **sub-unidad U3b:** se asocia a la secuencia volcanosedimentaria mesozoica de la Formación Mesa, representada por un intervalo de resistividades entre 40 y 80 $\Omega \cdot m$;
- **sub-unidad U3c:** incluye valores de resistividad muy altos que sobrepasan los 80 $\Omega \cdot m$, e identifica a los cuerpos intrusivos de la región
- **sub-unidad U3d:** esta sub-unidad representa un macizo rocoso con un grado de fracturamiento relativamente alto, lo que hace de la zona donde se presenta una porción altamente conductora, y por lo tanto, representada por resistividades muy bajas ($<15 \Omega \cdot m$) que se tienen generalmente entre zonas con mayor resistividad. Si bien es cierto que en el presente estudio geofísico esta sub-unidad no fue identificada, regionalmente aparece como parte de las características resistivas en el subsuelo.

Para la localización de los sitios de medición se utilizó un equipo GPS marca GARMIN, el cual proporciona las coordenadas geográficas (X, Y) y una elevación con un margen de error aceptable para cada sitio de medición.

Tabla 5. Coordenadas de sitios propuestos para la zona centro. Por IDEAS, (2017).

PRIMERA OPCIÓN ZONA CENTRO					
NOMBRE	POZO	PROFUNDIDAD (m)	X	Y	Elevación (msnm)
TC-03	Pozo N.-1	250	565051.47	3411891.1	1278
TC-06	Pozo N.-2	250	565642.85	3412436.37	1275
TC-10	Pozo N.-3	300	565753.77	3413448.18	1297
SEGUNDA OPCIÓN ZONA CENTRO					
NOMBRE	POZO	PROFUNDIDAD (m)	X	Y	Elevación (msnm)
TC-02	Pozo N.-4	200	565326.88	3411425.51	1250
TC-04	Pozo N.-5	200	565333.21	3411935.58	1261

4.3.1. Perfil de resistividad SW-NE 02

Este perfil fue construido a partir del análisis de 3 TEM (TC-03, TC-04 y TC-06), tiene una orientación general SW-NE y una longitud de casi 0.75 km (Figura 19). La interpretación general de este perfil evidencia la presencia de una cuenca tectónica que se profundiza hacia el noreste hasta alcanzar un máximo de 410 m en el TEM TC-06.

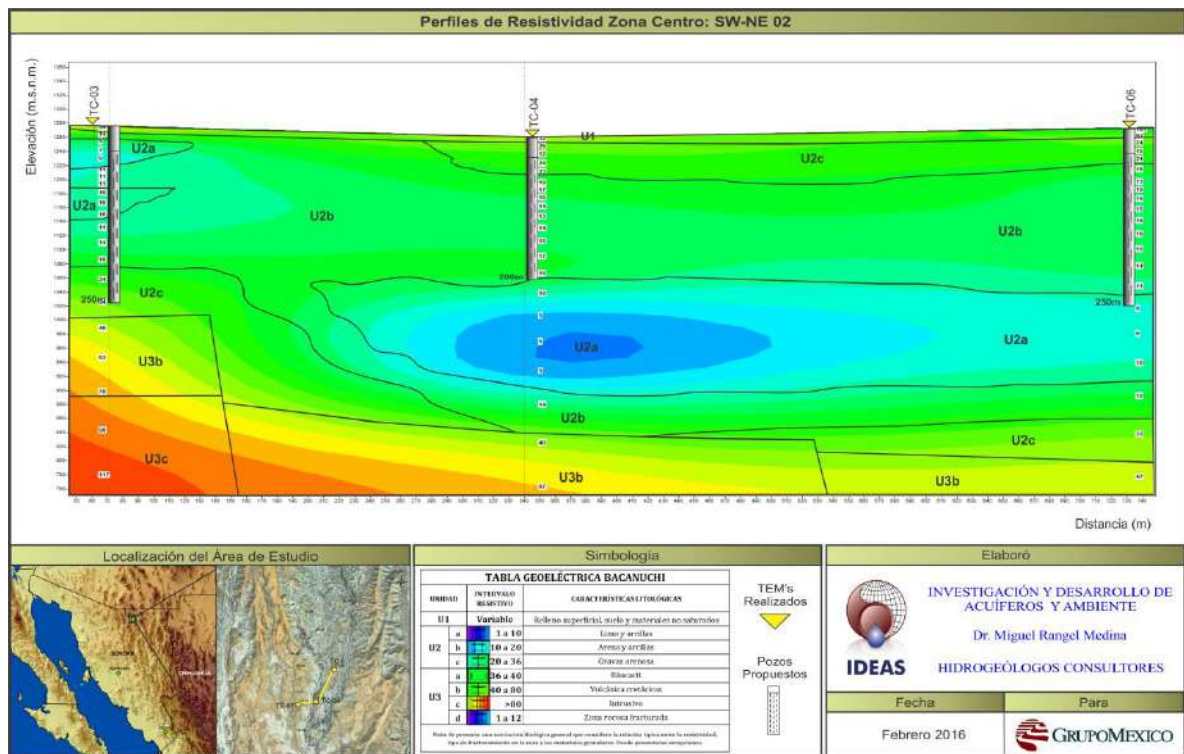


Figura 19. Perfil de resistividad SW-NE 02. Por IDEAS, (2017).

La unidad U1 continúa dominando la porción más superficial del perfil, con espesores reducidos y resistividades entre 30 y 101 $\Omega \cdot m$. La sub-unidad U2a se identificó como dos pequeños cuerpos lenticulares someros en el TEM TC-03, con resistividades entre 5 y 10 $\Omega \cdot m$ y un espesor de casi 40 m; además se presenta como una capa gruesa en los TEM TC-04 y TC-06 que inicia a una elevación de 1060 msnm, con el mismo rango de resistividad pero con espesores de 150 y 125 metros respectivamente. La sub-unidad U2b es la que presenta una mayor distribución en el subsuelo, con resistividades que varían entre 13 y 19 $\Omega \cdot m$.

La sub-unidad U2c sigue reconociéndose a la base de la sub-unidad U2b, a excepción del TEM TC-04, con un rango resistividad entre 24 y 34 $\Omega \cdot m$; al igual que en el perfil descrito anteriormente, esta unidad también aparece a pocos metros de profundidad en los TEM TC-04 y TC-06 con resistividades dominantes de 24 $\Omega \cdot m$. Los valores resistivos dominantes en la porción basal de este perfil (40-76 $\Omega \cdot m$) identifican a la sub-Unidad U3b, y solo en TEM TC-03 se presenta la sub-unidad U3c con resistividades entre 98 y 117 $\Omega \cdot m$.

4.3.2. Perfil geoelectrico SW-NE 02

La interpretación geoelectrica muestra un relleno sedimentario dominado por la fracción arenosa con el desarrollo del cuerpo de arcillas de probable origen lacustre a profundidad (Figura 20), y la presencia de una sedimentación más gruesa en las porciones más someras del perfil. El basamento rocoso de la cuenca se profundiza hacia el NE a partir de una serie de fallas normales con buzamiento en dicha dirección que lo afectan. Para este perfil se proponen los 3 TEM como sitios favorables para la perforación. Las profundidades sugeridas en estos sitios son: 250 m para el TEM TC-03, 200 m para el TC-04 y 250 m para TC-06; en éstos dos últimos, se pretende aprovechar el mayor espesor de los sedimentos arenosos de la sub-unidad U2b y la fracción más gruesa de la U2c.

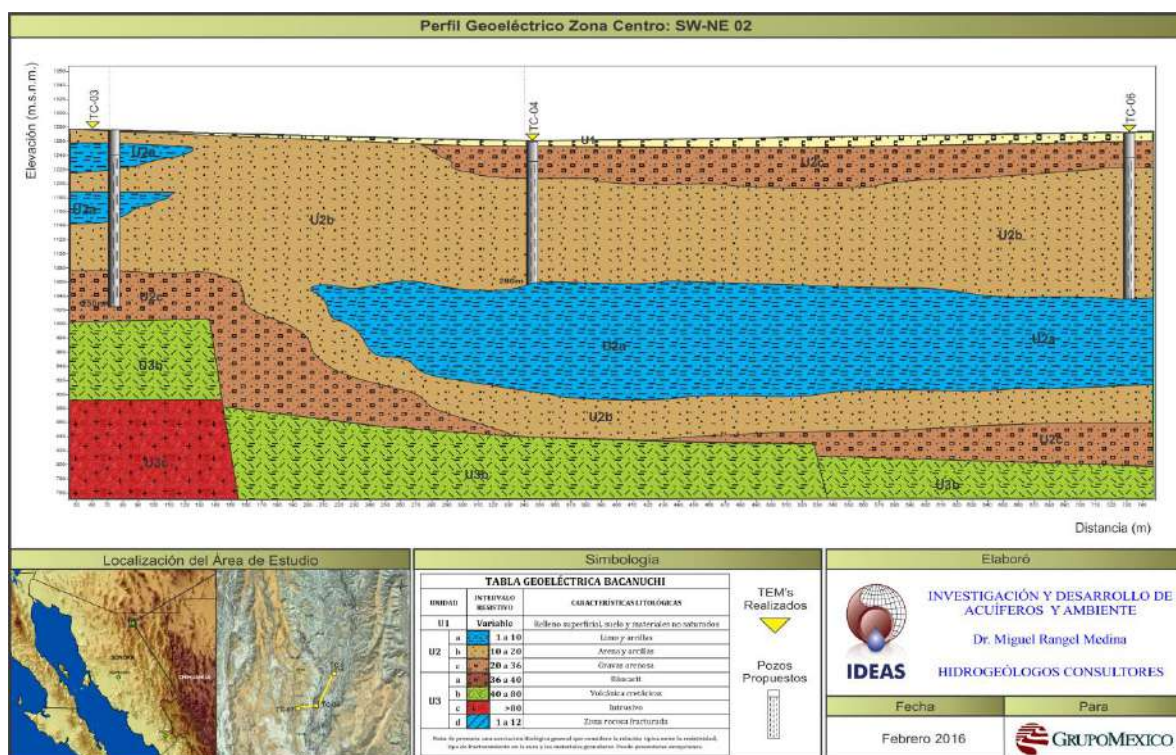


Figura 20. Perfil geoelectrico SW-NE 02 de la zona centro. Por IDEAS, (2017).

4.3.3. Sitios propuestos

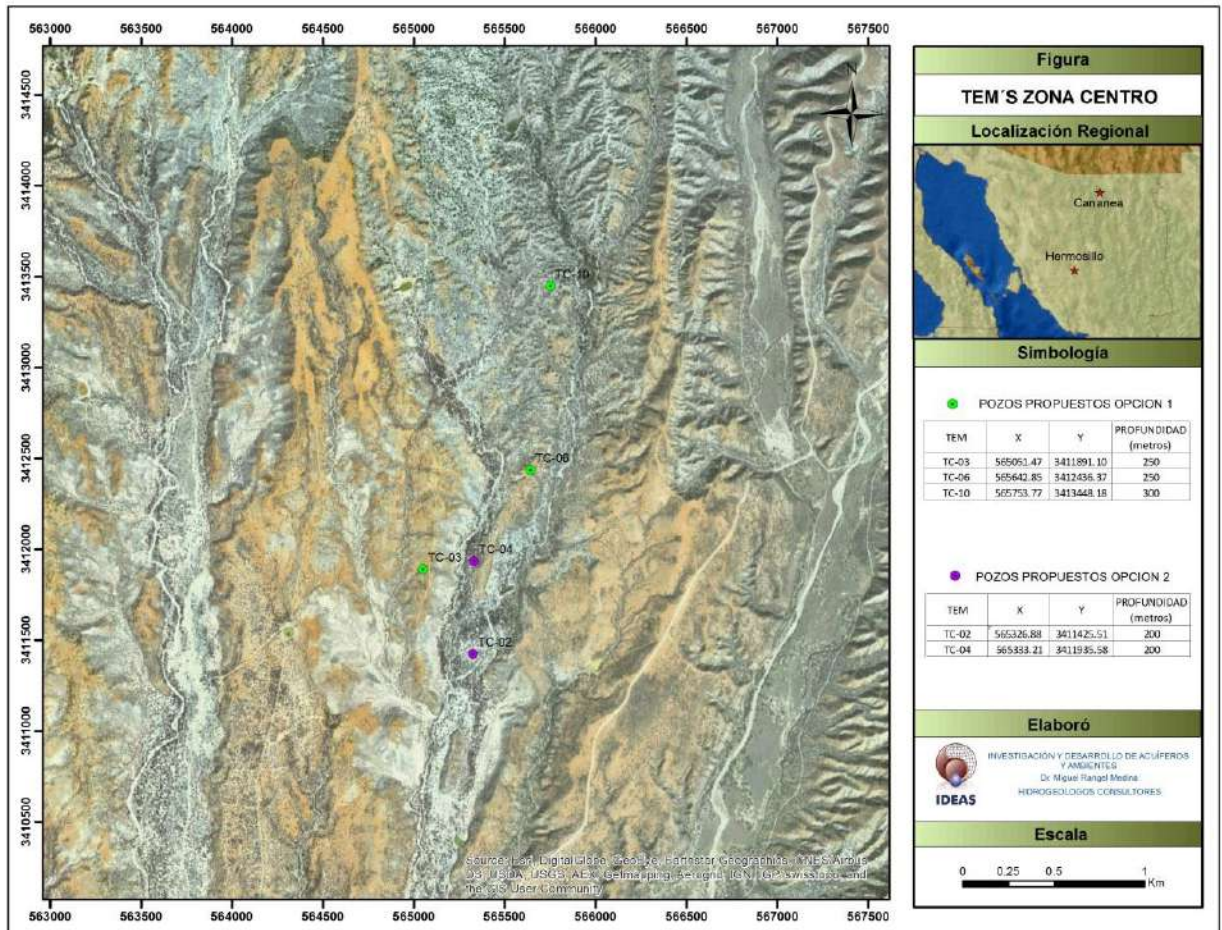


Figura 21. Sitios propuestos zona centro (piezómetro TC-06). Por IDEAS, (2017).

5. MÉTODO DE PERFORACIÓN

5.1. Maquinaria empleada

En la actualidad, tanto los métodos como las tecnologías en cuanto a la construcción de pozos para la explotación de los recursos naturales existentes en el subsuelo, han tenido un gran desarrollo en las últimas décadas. Lo anterior se debe en gran parte a la amplia variedad de condiciones geológicas que se han encontrado, algunos métodos pueden ser buenos y económicamente rentables, sin embargo, no implica que el mismo método funcione o sea el más eficiente en otras condiciones ya que depende, en gran medida, de la profundidad a perforar, el diámetro, formaciones geológicas, uso del pozo, entre otros factores. De manera general se utilizan 2 sistemas básicos de perforación: el de percusión (martillo) y el rotatorio (tricónica). Los piezómetros o pozos de exploración, se perforan utilizando barrenas tipo martillo debido a las condiciones del suelo, diámetro de perforación y disminución tanto en tiempos de perforación como en costos.

La maquinaria empleada para la perforación del piezómetro MX-03, fue una GEFCO STAR 50K neumática, la cual utiliza aire como mecanismo de perforación y acción neumática (Figura 22), el aire utilizado es suministrado por un compresor montado en la misma máquina de perforación; mide 900 ft³ y tiene una capacidad de hasta 350 PSI sostenibles (Figura 23).



Figura 22. Maquinaria tipo neumática empleada para perforar piezómetro MX-03.



Figura 23. Compresor montado en GEFCO STAR 50K con 350 PSI.

Para el pozo de producción TC-06, la maquinaria utilizada fue una MIDWAY tipo rotaria montada sobre camión (Figura 24) y debido a que se empleó una barrena tricónica para trabajar con lodo, fue necesario emplear una bomba de lodos.



Figura 24. Maquinaria tipo rotaria empleada y bomba de lodos empleada para perforación de pozo TC-06.

5.2. Perforación con barrena tipo martillo neumático descendente

Este tipo de perforación fue empleada en el piezómetro MX-03 utilizando aire comprimido como si fuera fluido, éste se hace circular por la tubería de perforación y escapa por las aberturas del trépano, subiendo posteriormente por el espacio anular que rodea a la tubería. El aire que se desplaza a gran velocidad dentro del pozo, arrastra los fragmentos hasta la superficie. Por las características de este método sólo se puede aplicar a formaciones consolidadas y es necesario utilizar un contraademe en la parte superior del pozo para evitar derrumbes.

El compresor mostrado en la figura 23, es el encargado de suministrar el aire como fluido de perforación. El trépano mencionado anteriormente (o martillo neumático), se encuentra colocado en el extremo inferior de la tubería, tiene incrustaciones de tungsteno fijadas a la periferia de los rodetes de acero y combina el efecto percusivo con la acción rotatoria, siendo conveniente para formaciones de gran dureza ya que disminuye los tiempos de perforación (Figura 25). Cuando se perforan suelos de roca sedimentaria que va de dura a blanda (sin llegar a ser no consolidado), se emplea espumante para ayudar a levantar el recorte de roca generado.



Figura 25. Martillo neumático empleado para la perforación de piezómetro MX-03.

El aire comprimido debe suministrarse a una presión de entre 99 y 110 PSI para extraer el recorte con efectividad, la velocidad ascendente del aire debe ser de aproximadamente 900 m/min o mayor, con una velocidad de rotación que va de 10 a 30 revoluciones por minuto (disminuyendo en las rocas duras y/o abrasivas). La profundidad total a perforar, se dicta en base a los estudios geofísicos previos del sitio, sin embargo, con este método de perforación el operador puede observar cuánta agua es expulsada del pozo conforme se avanza, lo que en algunos casos permite juzgar si se ha alcanzado la zona acuífera o fracturada antes de lo esperado.

5.3. Perforación con barrena tipo rotaria

Para el pozo de producción TC-06, se empleó una barrena tipo rotaria tricónica con circulación directa y remoción de fragmentos mediante un fluido (lodo) que continuamente se hace circular, conforme el trépano fijado en el extremo inferior de la sarta de tubería, penetra en los materiales (Figura 26). En este sistema, el fluido o lodo de perforación es bombeado a través de la tubería y expulsado por las boquillas de ésta. Posteriormente, el lodo fluye verticalmente hasta la superficie por el espacio anular que se encuentra alrededor de la tubería; una vez en la superficie del terreno, el fluido se conduce hasta una fosa de sedimentación (bomba de lodos en este caso) y de ahí a otra reserva (Figura 27). Una vez que el contenido de fragmentos se haya sedimentado o “colado” por la bomba, el lodo es re-bombeado al interior del pozo. En este tipo de perforación, es indispensable la barrena (al momento de cortar) y el fluido de perforación para mantener el pozo.

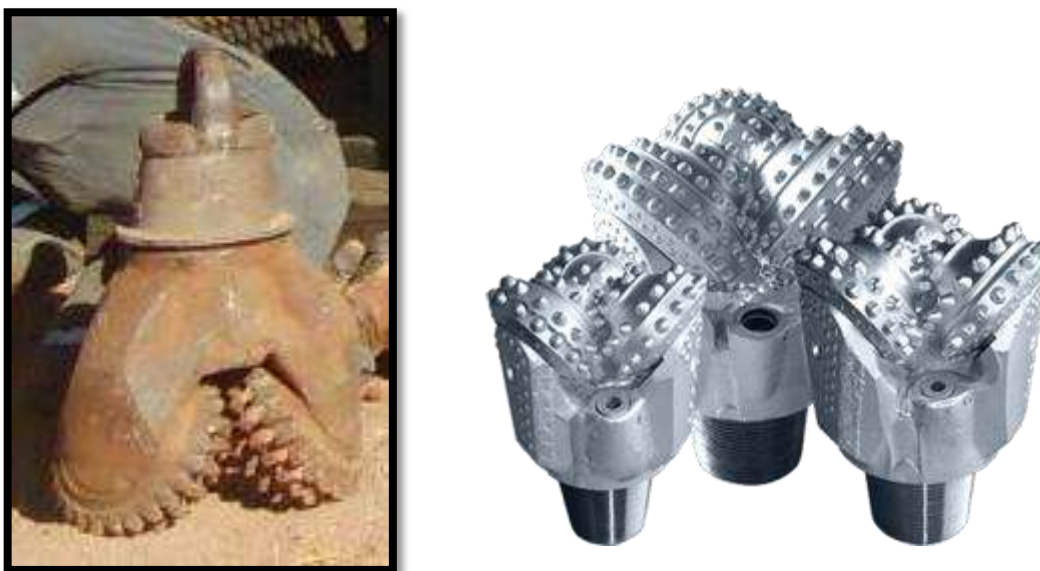


Figura 26. Barrena tipo rotaria tricónica empleada en la perforación de pozo TC-06.

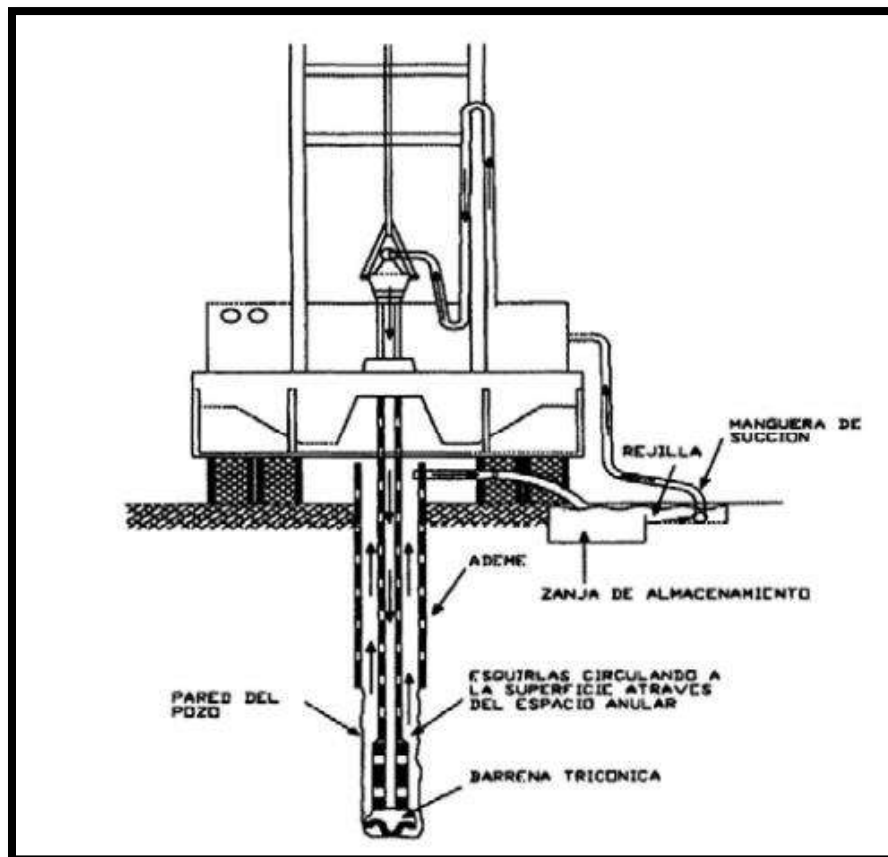


Figura 27. Diagrama de circulación directa con barrena rotaria. Por CONAGUA, (2007), pp.84.

5.4. Fluidos de perforación

Hace algunos años se empleaban arcillas naturales con agua como el principal fluido usado en la perforación rotaria, sin embargo, actualmente son numerosos los aditivos que se pueden emplear y, en su mayoría, son los responsables de elevar el costo en las perforaciones.

En la perforación con martillo el principal fluido empleado es el aire, aunque algunas veces se puede emplear simultáneamente con agua y espumante, mientras que en las perforaciones con rotaria se utilizan arcillas y polímeros mezclados con agua. Las formaciones geológicas no sólo definen el equipo de perforación a utilizar, sino también los fluidos; en formaciones no consolidadas se suele utilizar fluido con base agua adicionada con arcillas debido a que provee un “enjarre” en las paredes del pozo dando estabilidad y evitando derrumbes, en el caso de formaciones consolidadas o semiconsolidadas se emplea aire gracias a que se obtiene un avance más rápido y a que disminuye el riesgo de derrumbes.

La importancia de utilizar fluidos de perforación cuya base es agua pura, radica en que éstos no influyan en la calidad del agua subterránea, pues una parte de ellos se introduce en las formaciones pudiendo provocar reacciones no deseadas tanto en los minerales como en las propiedades fisicoquímicas del agua subterránea.

5.4.1. Propiedades de los fluidos

Las propiedades físicas y químicas de los fluidos de perforación son de suma importancia ya que gran parte del avance diario se basa en dichas características, por lo que se monitorean constantemente para proporcionar trabajos eficientes. Dichas características son: densidad, viscosidad, gelatinización, punto cedente, filtrado, enjarre, pH y cloruros.

5.4.1.1. Densidad

Definida como la relación de masa dividida por unidad de volumen, tiene la función de mantener a los fluidos contenidos dentro del agujero en el yacimiento durante la perforación, manteniendo de este modo la presión requerida que ejercen las paredes del agujero. Para evitar la entrada de fluidos desde la formación hacia el agujero, el lodo debe proveer una presión mayor a la presión de poros encontrada en los estratos a ser perforados.

Las unidades comunes de densidad son libras por galón (lb/gal), libras por pie cúbico (lb/ft^3), kilogramos por centímetro cúbico (kg/cm^3) y gramos por centímetro cúbico (gr/cm^3), siendo esta última la más utilizada (Figura 5.7). El rango de densidades va de 1.07 a 2.50 gr/cm^3 , lo cual permite una óptima velocidad de penetración al contrarrestar la presión de formación, sin provocar pérdidas de circulación. Para prevenir la entrada de fluidos desde la formación al agujero, el lodo debe proveer una presión mayor a la presión de poros encontrada en los estratos a ser perforados. Un exceso en la densidad del fluido puede ocasionar la fractura de la formación con la consiguiente pérdida de fluido de control.

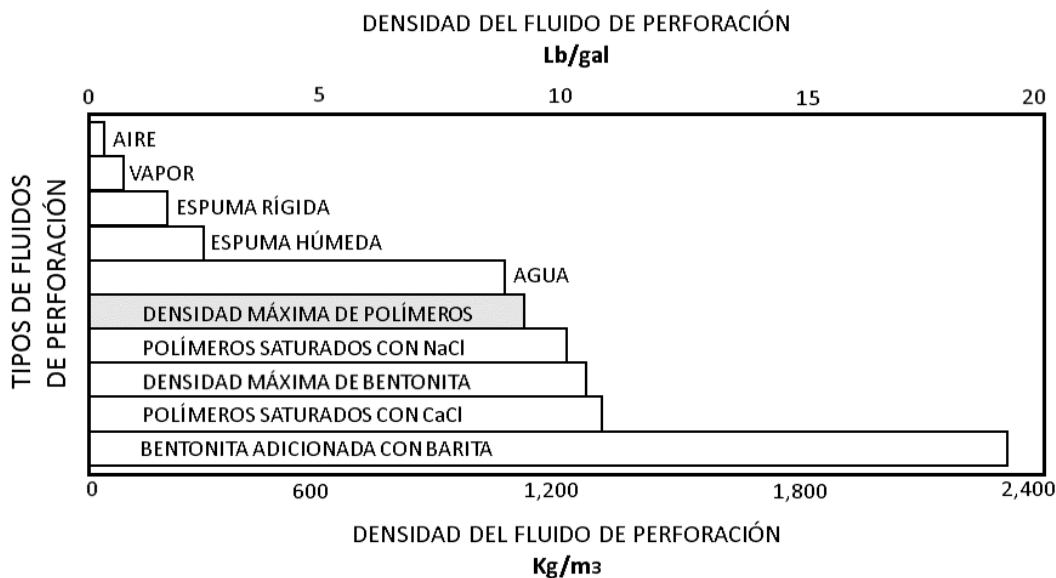


Figura 28. Densidades de los fluidos de perforación. Por CONAGUA, (2007), pp. 95.

5.4.1.2. Viscosidad

Es una medida de resistencia al flujo de una sustancia; en el campo de la perforación se mide utilizando el embudo de Marsh. En este caso la viscosidad se emplea como un indicador relativo a la condición del fluido ya que no proporciona información detallada de las características del mismo. Para mantener un balance entre la densidad y la viscosidad, se debe agregar agua y/o aditivos periódicamente al fluido de perforación; para disminuirla se agrega agua, para aumentarla se agrega bentonita u algún otro aditivo.

El procedimiento para medir la viscosidad en el embudo de Marsh es simple: se tapa con un dedo el extremo inferior del embudo al mismo tiempo que se llena hasta el nivel marcado, después, se separa el dedo para permitir que descargue el fluido desde el embudo. El tiempo en segundos requerido para descargar un litro del líquido, se define como la viscosidad por embudo Marsh expresada en segundos (Tabla 6). Se requiere de una baja viscosidad efectiva para que el lodo desprenda los cortes al llegar a la superficie, la medida se determina en segundos y en un rango normal puede ser de **45 a 75 segundos** para los lodos base agua y de hasta 160 segundos para lodos de emulsión inversa.

Tabla 6. Viscosidades por embudo de Marsh (materiales no consolidados). Por CONAGUA, (2007), pp. 95.

MATERIAL	VISCOSIDAD (Seg)
Arena Fina	36-46
Arena Media	46-56
Arena Gruesa	56-66
Grava	66-76
Grava Gruesa	76-86

5.4.1.3. Gelatinización

La consistencia gelatinosa es una medida de la capacidad del fluido de perforación para mantener en suspensión las partículas arrancadas en la perforación y mantiene una cerrada relación con la viscosidad. En general, esta propiedad es raramente controlada debido a que su manejo requiere de la adición de aditivos que pueden impactar la calidad del agua. La tasa de gelatinización se refiere al tiempo requerido para formarse el gel. Si la gelatinización se forma lentamente después de que el lodo está en reposo, se dice que ésta es baja, siendo alta en caso contrario.

5.4.1.4. Punto cedente

Es una medida de la fuerza de atracción entre las partículas, bajo condiciones dinámicas o de flujo; es la fuerza que ayuda a mantener el fluido una vez que entra en movimiento y está relacionado con la capacidad de limpieza del fluido en condiciones dinámicas. Cuando el punto cedente es alto, debido a los contaminantes solubles como el calcio, carbonatos y por los sólidos arcillosos de las formaciones, se provoca la floculación del lodo que debe de controlarse con dispersantes.

5.4.1.5. Filtrado

Indica la cantidad relativa de líquido que se filtra a través del revoque hacia las formaciones permeables cuando el fluido es sometido a una presión diferencial; debe mantenerse lo más bajo posible para evitar dañar las formaciones y proveer una buena estabilidad al agujero.

5.4.1.6. Enjarre

Este parámetro hace referencia a la delgada capa de lodo que se forma en las paredes del pozo, su grosor puede variar entre 1 y 4 mm; es necesario ya que, de no formarse, el lodo invadiría las formaciones geológicas más permeables. La formación y grosor del enjarre dependen principalmente de la pérdida de agua que se registre, así como de la permeabilidad de la roca.

5.4.1.7. pH

La medición del Ph en el lodo es un indicativo de la acidez o basicidad del mismo; valores bajos y altos respectivamente, donde 7 es un valor neutro, 14 el valor más alto y 1 el más bajo. El valor propio del pH para un fluido de perforación depende de su tipo, pero normalmente deben de ser de 8.5 a 10.5 para obtener un pH estable y duradero; para esto se utiliza sosa cáustica o hidróxido del potasio.

Tabla 7. Referencia de pH de algunas sustancias. Por <http://www.ptolomeo.unam.mx>, pp.18.

pH	CONCENTRACIÓN [H ⁺]	TIPO	CONCENTRACIÓN [OH ⁻]	SUSTANCIA
0	1	Ácidos	10 ⁻¹⁴	Disolución de HCl
1	10 ⁻¹		10 ⁻¹³	Jugo gástrico
2	10 ⁻²		10 ⁻¹²	Jugo de limón
3	10 ⁻³		10 ⁻¹¹	Refresco de cola
4	10 ⁻⁴		10 ⁻¹⁰	Vino, vinagre
5	10 ⁻⁵		10 ⁻⁹	Café negro
6	10 ⁻⁶		10 ⁻⁸	Lluvia ácida, té
7	10 ⁻⁷	Neutro	10 ⁻⁷	Agua pura
8	10 ⁻⁸	Bases	10 ⁻⁶	Lagrimas, saliva
9	10 ⁻⁹		10 ⁻⁵	Agua de mar
10	10 ⁻¹⁰		10 ⁻⁴	Agua de jabón
11	10 ⁻¹¹		10 ⁻³	Agua de cal
12	10 ⁻¹²		10 ⁻²	Amoniaco
13	10 ⁻¹³		10 ⁻¹	Blanqueador
14	10 ⁻¹⁴		1	Hidróxido de sodio

5.4.1.8. Cloruros

La concentración de cloruros se denota en un aumento de la salinidad, solubilidad de las sales y aditivos de los lodos, provocando reacciones químicas tales como la precipitación. El ion cloruro proviene de la disociación electrolítica del cloruro de sodio (NaCl) al estar en solución acuosa. La contaminación del lodo por los cloruros puede provenir de las siguientes tres fuentes:

1. Del agua de alimentación al lodo cuya salinidad puede alcanzar hasta 20 ppm.
2. Del flujo de agua salada de la formación.
3. De las sales agregadas al lodo por los estratos de sal perforados.

5.4.2. Funciones de los fluidos

Los fluidos de perforación pueden desempeñar varias funciones, dependiendo de las condiciones físicas y químicas que se encuentren en la perforación de los pozos, entre ellos se encuentran las siguientes:

5.4.2.1. Remoción del “recorte” del fondo del pozo

Una de las principales funciones del lodo de perforación, es remover las partículas de roca que se van quedando en el fondo del pozo durante la perforación. Lo anterior va a depender de factores como la viscosidad, densidad y velocidad de ascenso del fluido de perforación, así como del tamaño y peso de los fragmentos rocosos. La relación entre ambos es directamente proporcional, entre mayor los fragmentos rocosos mayor deberá ser la viscosidad.

En la superficie, el lodo se asienta en una fosa donde se deposita. De aquí se derrama a una fosa de almacenamiento donde nuevamente se eleva y recircular por medio de la bomba. Una remoción ineficiente de los cortes puede reducir el intervalo de perforación y de vida útil de la barrena, afectar las propiedades físicas del fluido e incrementar la energía necesaria para recircular el fluido.

5.4.2.2. Ademar paredes del pozo

El fluido de perforación retiene las paredes del pozo mediante un tipo de “enjarre” y evita su socavamiento, además permite controlar las pérdidas de fluidos en formaciones altamente permeables. No es posible calcular con exactitud la presión que tendería a derrumbar el pozo rodeado por diversos materiales a varias profundidades, por lo que depende en gran medida de la experiencia del perforista. Por otro lado, el espesor de dicho enjarre o película depende de la capacidad de perder agua de las arcillas que forman el fluido y de la diferencia de presión en éste dentro del pozo. Así, si el agua es expulsada rápidamente, se forma un filtro muy grueso que puede tener efectos contraproducentes en el desarrollo de la formación de pozo.

5.4.2.3. Enfriamiento de la barrena de perforación

El mismo fluido de perforación (preparado adecuadamente), constituye un lubricante para la barrena, la bomba de lodos y la tubería de perforación; repercutiendo en la vida útil de la barrena, así como en la disminución de gastos por mantenimiento.

5.4.2.4. Suspensión de cortes y fragmentos

La capacidad de un fluido para mantener las partículas en suspensión crece rápidamente conforme la velocidad y la viscosidad de éste aumentan. Después de que los cortes son llevados a la superficie, es esencial que estos sean separados del lodo, conforme el fluido se desplaza por la fosa de sedimentación, a una velocidad reducida. Un buen fluido de perforación puede mantener partículas en suspensión, puesto que desarrolla cierta consistencia gelatinosa cuando la circulación se hace más lenta o se detiene.

6. DESARROLLO DE PRÁCTICAS PROFESIONALES

6.1. Etapa exploratoria

Debido a la heterogeneidad del subsuelo, aun cuando se disponga de los estudios previos concernientes de exploraciones indirectas o de datos acerca de pozos circunvecinos, las condiciones hidrogeológicas existentes en un sitio sólo pueden conocerse con detalle a través de una exploración directa. Por ello, todo pozo en un principio tiene un carácter exploratorio y una vez que se obtienen los datos hidrogeológicos (estratigrafía, litología, localización, niveles, calidad del agua, etc.), se procede a diseñar su terminación para convertirlo en un pozo de bombeo o de inyección.

6.1.1. Construcción de piezómetro MX-03

Un piezómetro es un barreno con un diámetro menor a 8 pulgadas, mismo que se adecua para facilitar la toma de mediciones del nivel de agua y así formar parte de una red piezométrica de monitoreo con la cual se determinan las variaciones hidráulicas y se establecen direcciones preferenciales de flujo.

La construcción del piezómetro MX-03, se inició el día 09 de enero del 2017 y culminó el 15 de enero del mismo año con la etapa de engravado. Para la perforación se empleó maquinaria tipo GEFCO STAR 50K neumática, la cual utiliza aire suministrado por un compresor como mecanismo de perforación y acción neumática. Con la exploración directa se pretenden conocer las características hidráulicas del acuífero; se realizó una prueba de inyección de aire a presión (tipo air lift) a una profundidad de 252 metros.

6.1.2. Localización

El sitio de interés se encuentra dentro del municipio de Cananea, Sonora, dentro del acuífero administrativo río Bacoachi; designado por la Comisión Nacional del Agua. Presenta coordenadas en la parte Este 568 635, hacia el Norte 3 423 144 y, una elevación de 1518 metros sobre el nivel del mar (Figura 29).

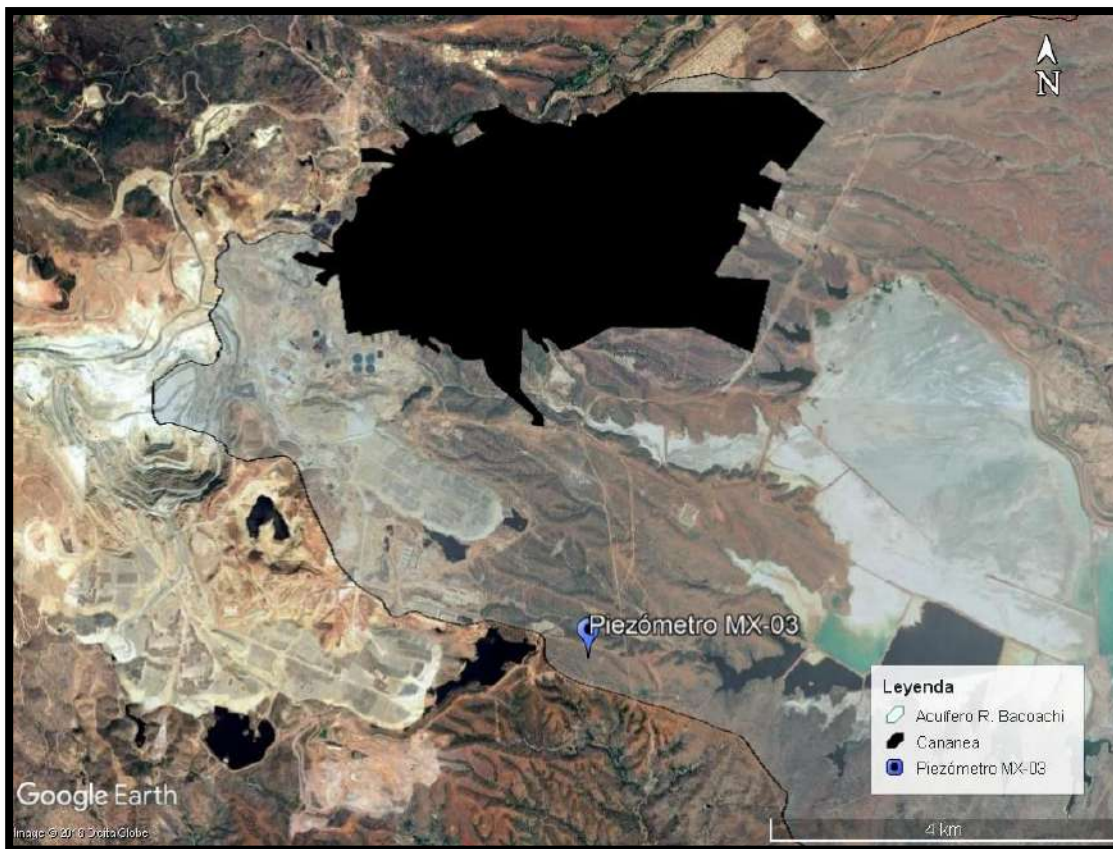


Figura 29. Localización piezómetro MX-03 en el municipio de Cananea, Sonora.

6.1.3. Metodología

Para la colocación del contraademe, fue necesario iniciar la etapa exploratoria con un martillo de 7 ¼” de diámetro, en este caso se perforaron 6 metros con dicho diámetro para instalar un contraademe de 6” de diámetro por 6 metros de largo; una vez colocado en su lugar, se prepara una mezcla de yeso y agua para fijarlo (Figura 30 y 31). Posteriormente, se procede a cambiar el diámetro del martillo por uno menor de 5 7/8” para retomar la etapa exploratoria.

A continuación, en la tabla 8, se muestra el avance por día y el acumulado de cada etapa en piezómetro MX-03.



Figura 30. Inicio de perforación martillo 7 1/4" de diámetro para colocación de contraademe.



Figura 31. Fraguado de contraademe en piezómetro MX-03.

Tabla 8. Avance diario de perforación exploratoria piezómetro MX-03. Por IDEAS, (2017).

FECHA	AVANCE (METROS)		OBSERVACIONES
	DIARIO	ACUMULADO	
09-ene-17	12.00	12.00	Contraademe/I Etapa Exploratoria
10-ene-17	91.00	103.00	I Etapa Exploratoria
11-ene-17	85.00	188.00	I Etapa Exploratoria
12-ene-17	19.00	207.00	I Etapa Exploratoria
13-ene-17	45.00	252.00	I Etapa Exploratoria
14-ene-17	0.00	252.00	Prueba Air lift/Entubado
15-ene-17	0.00	252.00	Engravado/Brocal

La construcción del piezómetro tuvo una efectividad del 100% ya que no se registraron atrasos ni percances, además, al utilizar maquinaria tipo neumática se tiene la ventaja de que su funcionamiento emplea únicamente agua y espumante Foam Star para ayudar a levantar el recorte generado, siendo las paredes del agujero o la roca encajonante el conducto de salida del mismo.

Se concluyó la etapa exploratoria a una profundidad de 252 metros el día viernes 13 de enero del 2017; posteriormente, el día sábado 14 de enero se realizó una prueba air lift misma que se detallará en un apartado más adelante junto con la discusión de resultados. El mismo día en el transcurso de la tarde, se procedió a entubar el piezómetro, para lo cual se emplearon 29 tramos de PVC de 6.10 metros de largo por 2” de diámetro, de los cuales, 7 tramos fueron ranurados y 22 de tipo liso para lograr un total de 177 metros ademados. Se presentaron algunos derrumbes dentro del piezómetro, lo que imposibilitó descender la tubería hasta el fondo.

El propósito de ademar el piezómetro es proteger la perforación en sí, evitar la corrosión e incrustaciones; la tubería ranurada permite el aporte del agua mientras que la tubería lisa protege (junto con el contraademe) la parte superior.

Para la etapa de engravado se utilizaron 2.5 m³ de filtro grava tipo sello bien clasificada y lavada de tamaño ¼” doblemente cribada, con el fin de brindar la mejor calidad en la misma y la mínima porción de finos que pudieran interferir con las mediciones de los piezómetros. La grava actúa como filtro, y se coloca en el espacio anular entre la pared del piezómetro y la tubería de PVC, procurando que llegue hasta el fondo del mismo. Una vez concluida la etapa de ademado y engravado, se procede con la edificación del brocal para proteger el piezómetro, así mismo se suelda una tapadera y se coloca un candado (Figura 32).



Figura 32. Construcción de brocal en MX-03.

6.1.4. Clasificación y análisis de muestras

La recopilación del corte litológico está a cargo del perforista y es supervisada por el hidrogeólogo para garantizar que la descripción litológica en relación a la profundidad de avance sea lo más certera posible. Las muestras se colectan en un intervalo de 3 metros; primeramente, se colocan en bolsas de plástico previamente identificadas con el nombre del piezómetro, fecha y el intervalo de metros a los que corresponde. Posteriormente, se toma una cantidad representativa de cada bolsa, se lava, se examina con lupa de mano 10X, se realiza una descripción detallada de lo observado y se coloca en pequeñas cajas de muestra denominadas “chip”. La importancia de lo anterior radica en contrastar la muestra obtenida con los perfiles geofísicos y corroborar la litología observada; tamaño de clastos, angulosidad, fracturamiento, oxidación, alteración, mineralización, litología, presencia de arcillas, arenas, gravas, entre otros (Figura 33).



Figura 33. Litología de piezómetro MX-03.

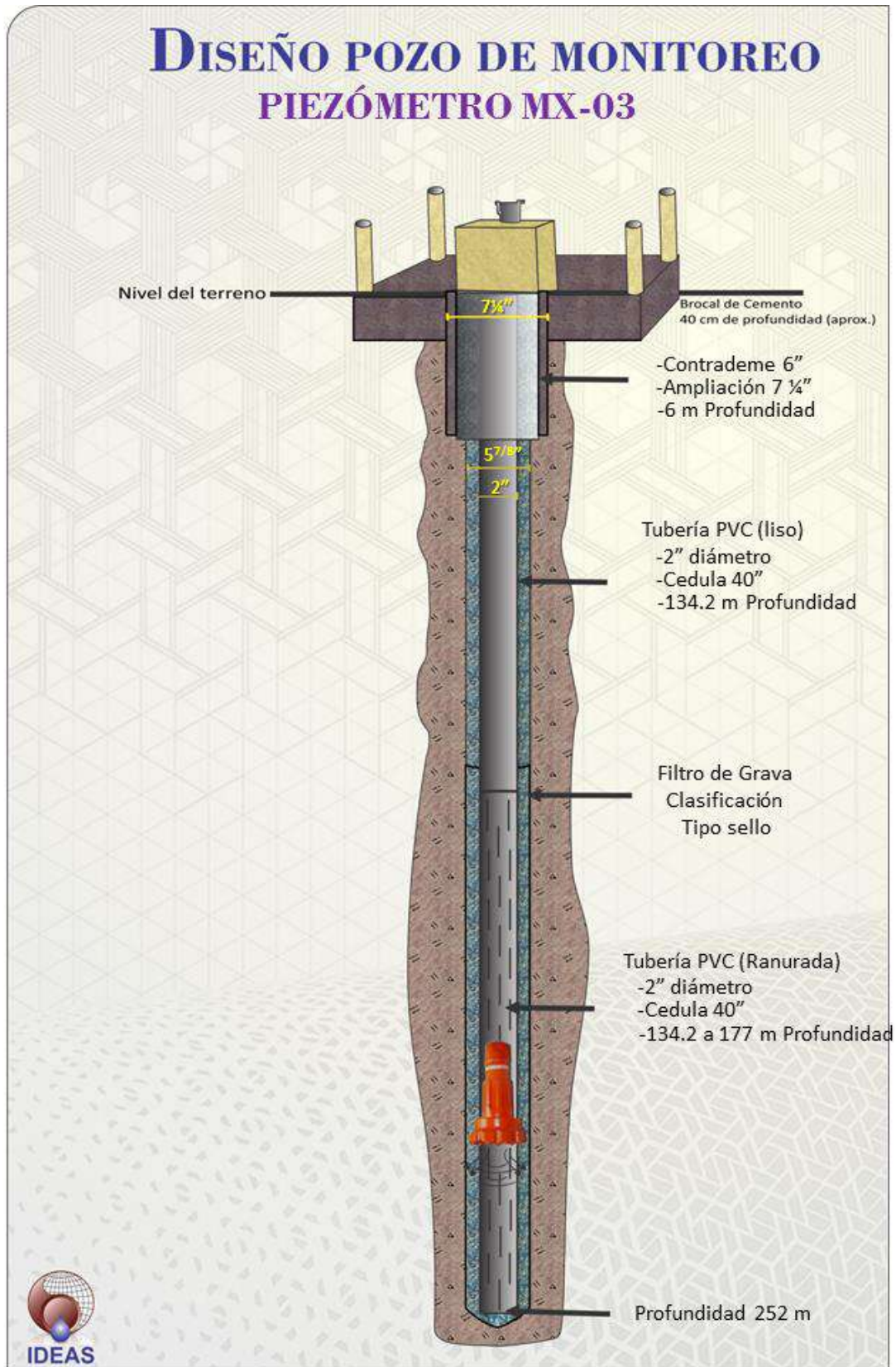


Figura 34. Diseño de piezómetro MX-03. Por IDEAS, (2017).

6.1.5. Prueba air lift

La prueba air lift se llevó a cabo en el piezómetro MX-03 a una profundidad de 252 metros perforados, con el objetivo de verificar el caudal de agua en el mismo; básicamente consiste en inyectar aire a una presión mínima de 300 PSI, expulsando el flujo de agua dentro del agujero bajo la siguiente metodología simplificada:

- a) Las barras de perforación se levantan lo suficiente para obtener una cámara de ensayo con longitud variable entre 0.5 y 2.5 m del fondo del barreno.

- b) Se instala la tubería de perforación o (TP) conectada a una barrena tricónica para que permita el libre paso de aire en la etapa de la prueba, así como el paso del flujo de agua en el interior de la tubería durante la etapa de recuperación. Utilizar la barrena tricónica también ayuda para que en el caso de algún derrumbe en el interior del agujero, sea factible maniobrar con el equipo y repasar el barreno, evitando un colapso o entierro de tubería.

- c) Una vez instalada la tubería se inyecta aire lo suficiente para levantar la columna de agua del barreno, manteniendo una descarga constante por lo menos 30 a 60 minutos, realizando esto las veces necesarias para definir bien el gasto aproximado del sitio. La inyección de aire está relacionada con la capacidad del acuífero, es decir si presenta condiciones favorables permitirá obtener un gasto constante (Figura 35). En el caso contrario, de abatir el sitio, se procede a dar por terminada la prueba antes de lo programado.

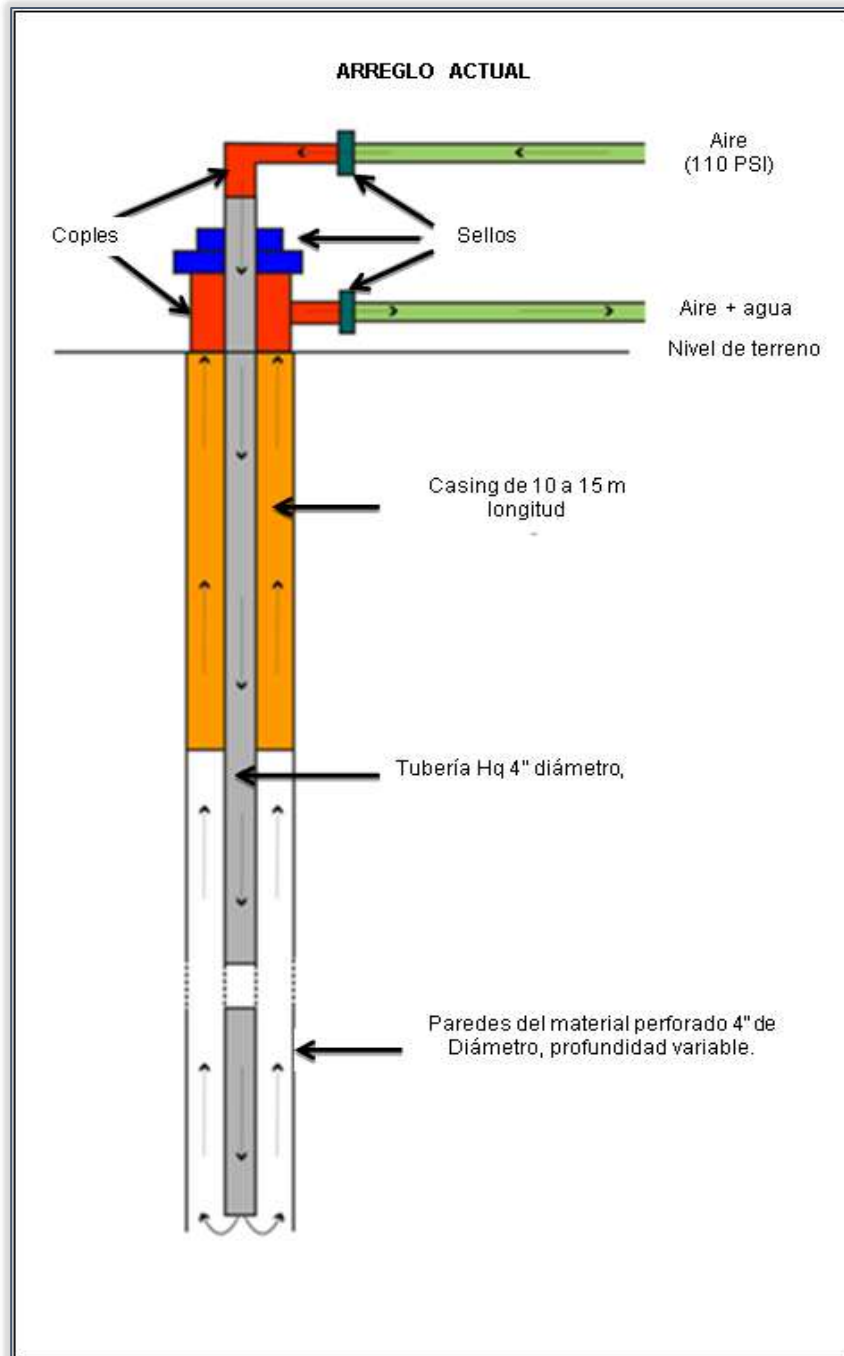


Figura 35. Arreglo simplificado de la prueba air lift. Por IDEAS, (2017).



Figura 36. Medición del gasto en piezómetro MX-03.

La prueba tuvo una duración total de 300 minutos entre el tiempo de inyección de aire y el tiempo de recuperación (Figura 36). Para el cálculo del gasto, se obtiene el volumen de un tanque con una capacidad máxima de 200 litros. Así mismo, se tomaron los tiempos de llenado; en la tabla 9 se muestran los datos obtenidos de 6 tomas con un caudal promedio de 1.05 lts/seg.

Tabla 9. Calculo del gasto de extracción. Por IDEAS, (2017).

Número de toma	Volumen M ³	Litros	Tiempo (seg)	Q(lps)
1	0.1122208	112.220831	102.4	1.0959066
2	0.0870284	87.0284	80.11	1.0862709
3	0.1076404	107.640389	103.2	1.043027
4	0.1007697	100.769726	95.4	1.0562864
5	0.1053502	105.350168	103.66	1.0162396
6	0.1099306	109.93061	111.35	0.9872529
PROMEDIO				1.0475

La etapa de recuperación a los 59 min (Tabla 10, Figura 37), mostró una profundidad del nivel dinámico de aproximadamente 142.93 metros, mientras que, a los 77 min muestra una profundidad del nivel dinámico de aproximadamente 135.98 metros de acuerdo a la profundidad del nivel estático inicial de **66.02 metros**. Lo anterior representa un porcentaje de recuperación 48.55%. El caudal promedio fue de 1.05 l/s, aplicando una presión de 350 PSI de capacidad.

Tabla 10. Recuperación del nivel estático con respecto al tiempo. Por IDEAS, (2017).

LONGITUD TOTAL DE 252m.					
HORA	TIEMPO (MIN)	NIVEL (M)	NIVEL CORR (M)	ABAT RESIDUAL	%REC
17:43	59	144.63	142.93	76.91	46.19044287
17:46	61	143.14	141.44	75.42	46.6770362
17:48	63	142.32	140.62	74.6	46.94922486
17:50	65	141.75	140.05	74.03	47.14030703
17:52	67	141.04	139.34	73.32	47.38050811
17:54	69	140.37	138.67	72.65	47.60943247
17:56	71	139.6	137.9	71.88	47.87527194
17:58	73	138.91	137.21	71.19	48.11602653
18:00	75	138.36	136.66	70.64	48.30967364
18:02	77	137.68	135.98	69.96	48.55125754

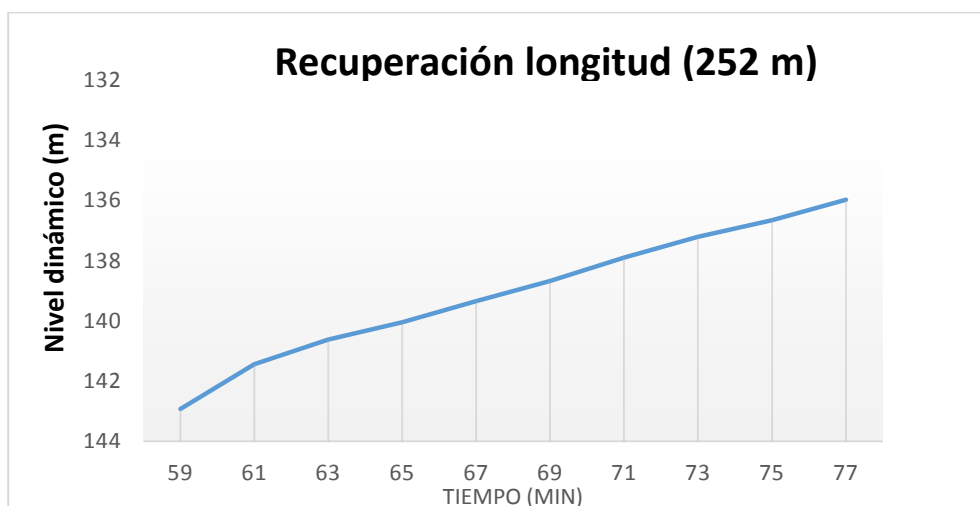


Figura 37. Gráfica de recuperación N.D. Por IDEAS, (2017).

6.1.5.1. Resultados prueba air lift piezómetro MX-03

Para la interpretación del resultado en este tipo de acuífero, se utilizó el método de recuperación de Theis en la etapa de medición del nivel estático con el apoyo del software AquiferTest v3.5. De este modo, se obtuvieron los valores de transmisividad y conductividad hidráulica que se muestran en la tabla 11. La grafica de la interpretación para la recuperación del nivel estático (método de Theis) se muestra en la figura 38.

Tabla 11. Resultados de la interpretación de las pruebas de air lift, Datum: WGS-84. Por IDEAS, (2017).

CLAVE	X	Y	Z	TRANSMISIVIDAD (m ² /s)	COND. HIDRAULICA (m/s)
MX-3	568635.740	3423144.854	1518	9.46E-09	3.15E-10

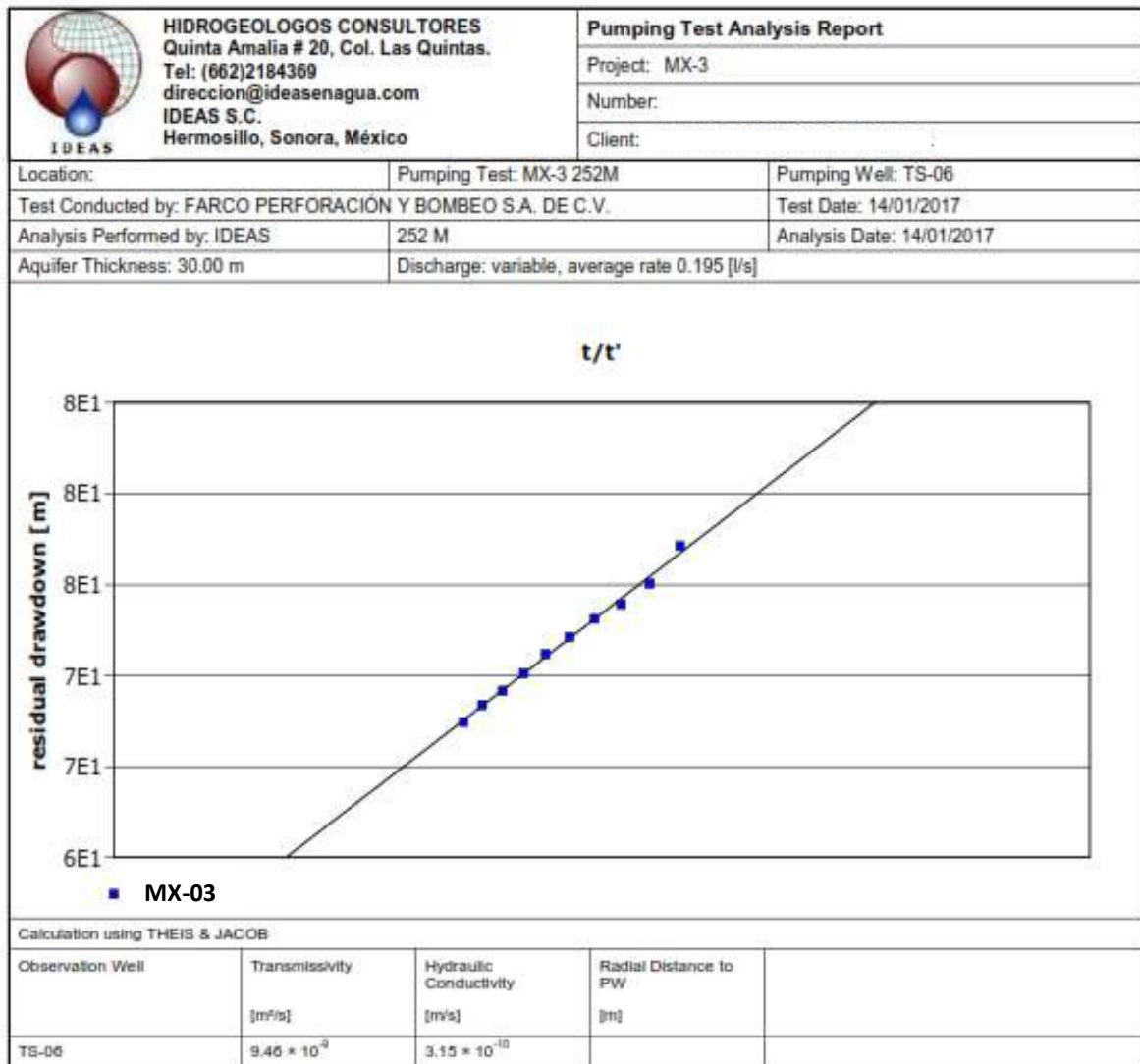


Figura 38. Resultados de la interpretación de la prueba de air lift en etapa de recuperación, piezómetro MX-03. Por IDEAS, (2017).

Un aprovechamiento óptimo para un pozo de producción requiere de valores superiores a los obtenidos en el presente informe. El valor de la transmisividad fue de 9.46×10^{-9} m²/s, mientras que el de conductividad hidráulica fue de 3.15×10^{-10} m/s. Lo anterior indica que el medio *no representa una zona productora adecuada* para los requerimientos demandados.

6.2. Etapa productiva

Cuando los valores arrojados por la prueba air lift denotan una zona productora adecuada, que cumple con los estándares y requerimientos para un pozo de producción, se procede a la construcción del mismo con un diámetro mayor y barrena tipo tricónica (en el caso del pozo TC-06).

6.2.1. Construcción de pozo TC-06

La maquinaria empleada para la perforación del pozo productivo TC-06, fue de tipo rotaria marca MIDWAY montada sobre camión, empleando barrenas tipo tricónicas con insertos de tungsteno de 24” y 17 ¾” de diámetro, tanto para la colocación del contraademe como para la culminación de la etapa exploratoria respectivamente, así como barras de perforación de 6.10 metros de largo promedio. Los preparativos en el área comenzaron el día 23 de noviembre del 2016, con la ubicación exacta del sitio a perforar, instalación del equipo y preparación de la bomba de lodos.

6.2.2. Localización

El sitio de interés se encuentra dentro del municipio de Cananea, Sonora, dentro del acuífero administrativo río Bacanuchi; designado por la Comisión Nacional del Agua. Presenta coordenadas en la parte Este 565 629, hacia el Norte 3 412 443 y, una elevación de 1275 metros sobre el nivel del mar (Figura 39).



Figura 39. Localización de pozo TC-06 en el municipio de Cananea, Sonora.

6.2.3. Metodología

El día miércoles 23 de noviembre del 2016, dio inicio la etapa exploratoria con un diámetro de 24 pulgadas para colocar un contraademe de 20” de diámetro por 12 metros de largo. Posteriormente, se retomó la etapa exploratoria con un diámetro de 17 ¾” desde los 12 metros y hasta una profundidad de 252 metros en un lapso de 13 días. Se presentó un retraso de 3 días en la construcción del pozo, debido a problemas con la captación del agua para concluirlo, por lo que la efectividad fue del 72 por ciento (Tabla 12).

Tabla 12. Días por actividad pozo TC-06. Por IDEAS, (2017).

ACTIVIDAD	DIAS
COLOCACIÓN DE CONTRAADEME	1
ETAPA EXPLORATORIA	12
ETAPA DE ADEMADO	1
ETAPA DE ENGRAVADO	1
CONSTRUCCIÓN DE BROCAL	1
SIN ACTIVIDAD	3
TOTAL DE DIAS	19

Durante la etapa exploratoria, se tuvo un avance diario promedio de 18.5 metros y fue necesario doblar turno dos días consecutivos para lograr dicho avance (Tabla 13 y Figura 40).

Tabla 13. Detalle del avance diario y acumulado. Por IDEAS, (2017).

FECHA	AVANCE (METROS)		OBSERVACIONES
	DIARIO	ACUMULADO	
23-nov-16	0.00	12.00	I ETAPA EXPLORATORIA
26-nov-16	20.00	32.00	I ETAPA EXPLORATORIA
27-nov-16	16.00	48.00	I ETAPA EXPLORATORIA
28-nov-16	19.00	67.00	I ETAPA EXPLORATORIA
29-nov-16	19.00	86.00	I ETAPA EXPLORATORIA
30-nov-16	20.00	106.00	I ETAPA EXPLORATORIA
01-dic-16	9.00	115.00	I ETAPA EXPLORATORIA
02-dic-16	18.00	133.00	I ETAPA EXPLORATORIA
03-dic-16	20.00	153.00	I ETAPA EXPLORATORIA
04-dic-16	18.00	171.00	I ETAPA EXPLORATORIA
05-dic-16	14.00	185.00	I ETAPA EXPLORATORIA
06-dic-16	47.00	232.00	I ETAPA EXPLORATORIA
07-dic-16	20.00	252.00	I ETAPA EXPLORATORIA
08-dic-16	0.00	252.00	ADEMADO
09-dic-16	0.00	252.00	SIN AGUA
10-dic-16	0.00	252.00	SIN AGUA
11-dic-16	0.00	252.00	SIN AGUA
12-dic-16	0.00	252.00	ENGRAVANDO
13-dic-16	0.00	252.00	BROCAL



Figura 40. Construcción de pozo TC-06 por etapas. Por IDEAS, (2017).

La maquinaria empleada para perforar el pozo TC-06 es de tipo rotaria, por lo que emplea lodo bentónico como aditivo principal para levantar el recorte hasta la superficie, además las paredes de la perforación evitando derrumbes y enfriar la barrena (Figura 41). La bentonita es un material compuesto por minerales de arcilla, principalmente montmorillonita con cantidades escasas de otros minerales del grupo de las esmectitas, se dilata considerablemente al contacto con el agua y su monitoreo debe ser constante para cumplir con las propiedades físicas descritas en el capítulo 5.



Figura 41. Etapa exploratoria pozo TC-06.

De igual manera, el uso adecuado de los lodos brinda información de gran valor en la exploración hidrogeológica, ya que el volumen de fluidos se puede perder durante la barrenación cuando los materiales atravesados son muy permeables, o pueden presentarse adelgazamientos al cruzar por tramos con fracturamiento de la roca que pueden contener agua. Este comportamiento puede sugerir cualquiera de estas situaciones. Durante la etapa exploratoria se emplearon 64 sacos de bentonita marca Perfobent de 50 kg cada uno y 151 m³ de agua, el equivalente a 3 200 kilogramos de bentonita y 151 000 litros de agua (Figura 42).



Figura 42. Sacos de bentonita (50 kg) empleados en la etapa exploratoria pozo TC-06 y medición de parámetros físicos.

Durante la etapa exploratoria, se midieron los parámetros físicos del lodo en diferentes profundidades y días. Comenzando por la conductividad tenemos un rango de valores que van de los 798 hasta los 2137 μs , los Sólidos Totales Disueltos (STD) se presentan en un rango de 454 a 1065 ppm, en promedio la temperatura es de 28.5°C, mientras que el pH presentó un valor promedio de 7.38, por último, la viscosidad se mantuvo en un rango de 35 a 41 segundos (Tabla 14 y Figura 43).

Tabla 14. Monitoreo de parámetros físicos del lodo perforación pozo TC-06. Por IDEAS, (2017).

Fecha	Hora	Metros	Conductividad	STD	TEM	Ph	Viscosidad
		m	μs	ppm	°C		Seg
26/11/2016	08:45	14	1820	926	27.7	7.4	39
28/11/2016	14:30	60	2137	1065	27.8	7.1	35
30/11/2016	15:55	87	1768	889	24.7	7.5	38
02/12/2016	14:04	130	895	454	31.3	7.6	41
04/12/2016	19:38	168	910	669	29.2	7.0	40
05/12/2016	18:59	180	1231	832	31.0	7.6	39
07/12/2016	15:04	250	798	1011	27.9	7.5	36



Figura 43. Toma de muestra de lodos para medición de parámetros físicos TC-06.

Para medir la eficiencia del equipo y mantener un control estructural durante la etapa exploratoria, se toman los tiempos de penetración del barreno por metro de avance. El tiempo de avance es un indicativo del grado de fracturamiento y estado de la roca, por lo cual, es necesario realizar un comparativo del tiempo de penetración con la litología encontrada en el sitio de perforación (Figura 44).

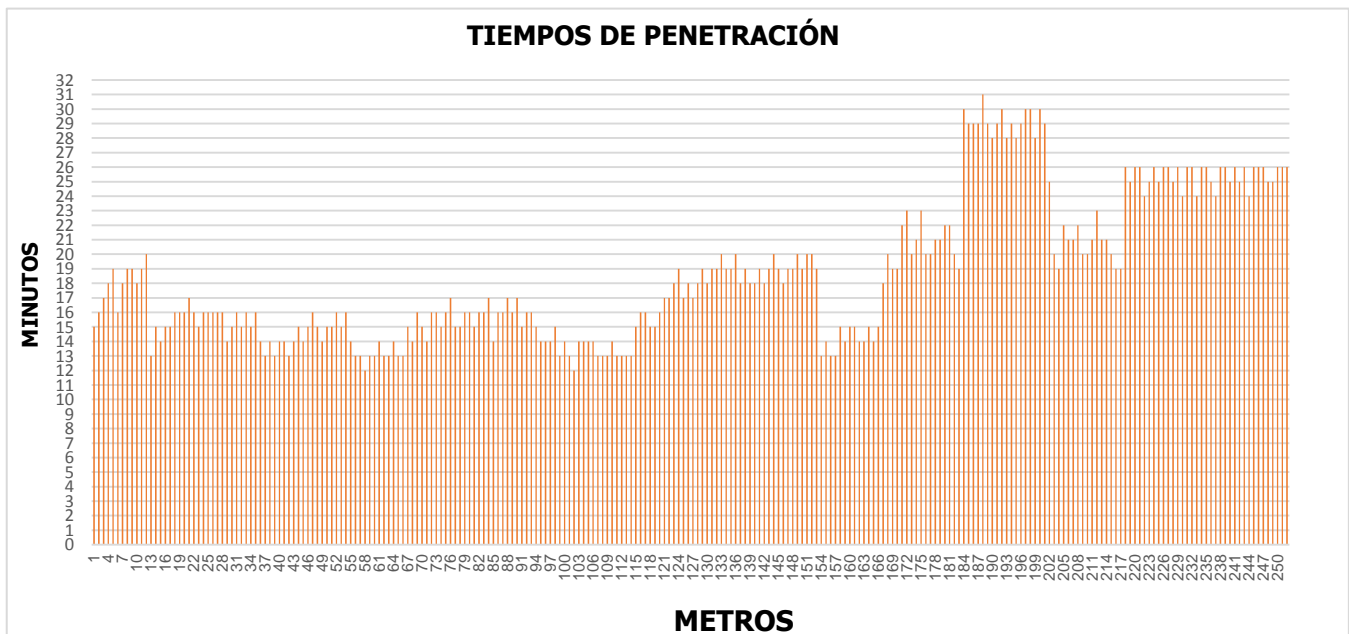


Figura 44. Tiempos de penetración (en minutos) por metro de avance en pozo TC-06. Por IDEAS, (2017).

6.2.3.1. Clasificación y análisis de muestras

La recopilación del corte litológico está a cargo del perforista y es supervisada por el hidrogeólogo para garantizar que la descripción litológica en relación a la profundidad de avance sea lo más certera posible. Las muestras se colectan en un intervalo de 3 metros; primeramente, se colocan en bolsas de plástico previamente identificadas con el nombre del piezómetro, fecha y el intervalo de metros a los que corresponde. Posteriormente, se toma una cantidad representativa de cada bolsa, se lava, se examina megascópicamente con lupa de mano 10X, se realiza una descripción detallada de lo observado y se coloca en pequeñas cajas de muestra denominadas “chip”. La importancia de lo anterior radica en contrastar la muestra obtenida con los perfiles geofísicos y corroborar la litología observada; tamaño de clastos, angulosidad, fracturamiento, oxidación, alteración, mineralización, litología, presencia de arcillas, arenas, gravas, entre otros (Figura 45).

La misma descripción y toma de muestras se realiza tanto para pozo exploratorio como para pozos de producción. A continuación, se observa la descripción geológica de las muestras colectadas en el pozo TC-06. Se presentaron gravas de distintos tamaños con una matriz que alternaba entre arenosa y arcillosa; este piezómetro tuvo una gran aportación de agua en parte por las capas impermeables que forman los sedimentos arcillosos, así como una serie de fallas normales con un buzamiento favorable (Tabla 15).

Tabla 15. Litología del pozo exploratorio TC-06. Por IDEAS, (2017).

DE	A	LITOLOGÍA
0	6	Material de relleno y suelo (fragmentos de roca diferente composición), material altamente intemperizado y oxidado.
6	9	Arenas finas bien clasificadas, presencia de abundante arcilla.
9	42	Gravas gruesas a medias, mal clasificadas, con poco boleó sostenidos en arenas finas con presencia de arcilla.
42	51	Gravas medias con poco boleó sostenidos en arenas finas y mucha arcilla.
51	54	Arenas gruesas, presencia de gravas redondas bien clasificadas y capas diferentes de arcilla.
54	63	Gravas gruesas a medias mal clasificadas con poco boleó sostenidos en arenas finas y mucha arcilla.
63	171	Arenas finas, bien clasificadas y ocasionalmente gravas gruesas de composición variable.
171	174	Gravas finas a medias, de composición variable sostenidas en un matriz de arenas finas
174	198	Arenas finas, con gravas bien clasificadas de composición variable
198	252	Arenas finas, bien clasificadas con gravas finas a medias sostenidas por una matriz arcillosa.



Figura 45. Descripción litológica

6.2.3.2. Ademado

Una vez concluida la etapa exploratoria del pozo con un diámetro de 17 $\frac{3}{4}$ ", se procede a colocar el ademe de 12" de diámetro para un gasto esperado de entre 20 y 44 LPS. Lo que se busca es satisfacer principalmente dos cuestiones:

- Que exista espacio suficiente para el alojamiento de la bomba; además del espacio libre que requiere su instalación y mantenimiento.
- Que el diámetro del ademe presente un espacio libre que garantice la buena eficiencia hidráulica del aprovechamiento en operación.

El espesor del ademe ayuda a evitar zonas factibles a derrumbarse o colapsarse, que perjudiquen la estructura del pozo y, además, es lo suficientemente resistente a esfuerzos de tensión, compresión, colapso, corrosión y degradación química (Figura 46).



Figura 46. Ademe de 12” de diámetro empleado en pozo TC-06.

Para la etapa de ademado en el pozo TC-06, se emplearon 6 tramos de tubería lisa de entre 6.1 y 6.2 metros de longitud con un diámetro de 12” completando 42 metros. Se ademaron, además, 208 metros con 34 tramos de tubería ranurada tipo canastilla, la cual tiene un diámetro de 12” y 6.10 metros de largo promedio; ésta presenta un área de mayor filtración y disminuye pérdidas por fricción. En total, el pozo TC-06 se ademó hasta una profundidad de 250 metros. Se colocó una “punta de lápiz” al inicio de la tubería para ayudar al descenso de la misma.

6.2.3.3. Engravado

Se instaló un filtro de grava bien clasificada en la zona que rodea inmediatamente el tubo de ademe, para obtener una mayor permeabilidad y una mejor eficiencia hidráulica del pozo, así como una buena estabilización de los materiales del acuífero. Posteriormente se circuló el pozo con agua para eliminar rastros de bentonita (Figura 47).



Figura 47. Etapa de engravado en pozo TC-06.

6.2.4. Diseño de pozo

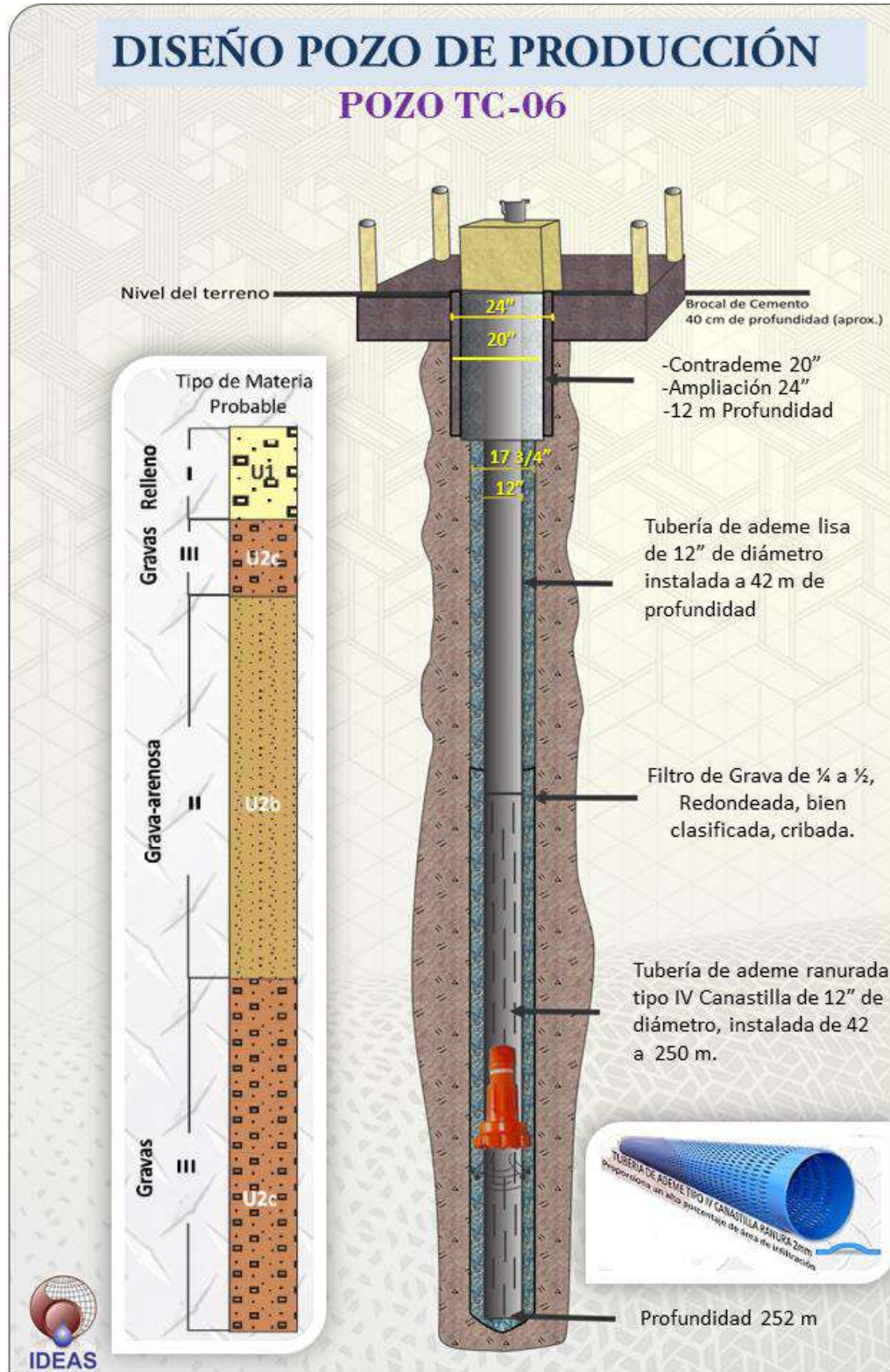


Figura 48. Diseño de pozo para TC-06. Por IDEAS, (2017).

7. PRUEBA DE AFORO

7.1. Generalidades

Una vez concluida la construcción del pozo TC-06, se realizaron algunas pruebas experimentales para obtener datos acerca de las características hidráulicas de funcionamiento de los pozos y del acuífero que se explota, dichas pruebas fueron: desarrollo del pozo, aforo y prueba a caudal constante. La prueba de aforo es la principal herramienta disponible para el estudio del comportamiento de los pozos, así como la predicción de caudales, tanto crítico como recomendable, y obtención de valores preliminares representativos de las características de las acuíferos, de esta forma, las pruebas de aforo permiten conocer las características de un pozo y parcialmente, el comportamiento hidráulico de acuífero, en la zona inmediata al pozo, estas pruebas representan un complemento a las pruebas de bombeo.

Para realizar un aforo se requiere de una bomba tipo turbina, accionada por un motor de combustión capaz de variar las revoluciones (r.p.m.), una columna de longitud tal, que la bomba no succione aire al abatirse el nivel de agua, un dispositivo de medición de caudal y una sonda eléctrica (Figura 49).



Figura 49. Instalación de equipo para aforo de pozo TC-06.

Para un óptimo desarrollo de la prueba de aforo, además de lo expuesto anteriormente, el pozo debe haber sido desarrollado correctamente con anterioridad y estar limpio, sin sedimentos en el fondo.

7.2. Ejecución de la prueba

7.2.1. Datos generales de la prueba hidráulica

Pozo No: TC-06
Fecha inicio: 01/FEB/2017
Fecha término: 04/FEB/2017
Municipio: CANANEA
Estado: SONORA
Coord. (WGS84 12 N):
X: 565629 **Y:** 3412443.58
Profundidad total: 250.00 m
Tubería de Ademe: 12”
Motor marca: CATERPILLAR ENGINE
R.P.M. máximo: 1900
Número de pasos: 10
Descarga: 6” anillo reductor a 5”
No de Tazones: 25
Tipo de Bomba: VERTICAL
Nivel estático: 25 m (01/FEB/2017)
Horas de Desarrollo: 36
Horas de Aforo: 23
Horas de Aforo a caudal constante: 23
Horas de recuperación del nivel dinámico: 3
Horas totales: 85

Supervisor: IDEAS S.A. DE C.V

7.2.2. Prueba de desarrollo del pozo

La prueba se realizó del 1 al 03 de febrero de 2017, el nivel estático inicial fue de 25 m y un nivel dinámico de 91.46 m después de 24 horas de bombeo (Figura 50 y 51), se obtuvo un caudal máximo de 24.38 l/s, la tabla 16 muestra la progresión de la evolución del nivel dinámico correspondientes a 10 pasos empezado con 1000 RPM y culminando en 1900 RPM. En la figura 52 se muestra de manera gráfica.



Figura 50. Medición del nivel estático.



Figura 51. Instalación de la descarga con 6" anillo reductor a 5".

Tabla 16. Registro datos de campo etapa desarrollo TC-06. Por IDEAS, (2017).

R.P.M.	TIEMPO	N.P.	GASTO	N.D.	N.D. CORR	Abat	N.D. - N.IMP.	caudal especifico	OBSERVACIONES
Cabezal	Hrs	(cm)	Q(l/s)	m	m	(m)	(m)	(l/s/m)	
1000	09:00								INICIO DESARROLLO
1000	10:00	4.00	9.752	42.90	42.10	17.90	121.10	0.545	AGUA TURBIA
1100	11:00	6.00	11.94371	49.00	48.20	24.00	115.00	0.498	AGUA TURBIA
1100	12:00	6.00	11.94371	50.12	49.32	25.12	113.88	0.475	AGUA TURBIA
1100	13:00	6.00	11.94371	50.91	50.11	25.91	113.09	0.461	AGUA TURBIA
1100	14:00	6.00	11.94371	51.30	50.50	26.30	112.70	0.454	AGUA TURBIA
1200	15:00	8.00	13.79141	56.36	55.56	31.36	107.64	0.440	AGUA TURBIA
1200	16:00	8.00	13.79141	56.94	56.14	31.94	107.06	0.432	AGUA TURBIA
1200	17:00	8.00	13.79141	57.38	56.58	32.38	106.62	0.426	AGUA TURBIA
1200	18:00	8.00	13.79141	57.77	56.97	32.77	106.23	0.421	AGUA LIMPIA
1300	19:00	10.00	15.41927	64.42	63.62	39.42	99.58	0.391	AGUA LIMPIA
1300	20:00	10.00	15.41927	65.50	64.70	40.50	98.50	0.381	AGUA LIMPIA
1300	21:00	10.00	15.41927	65.58	64.78	40.58	98.42	0.380	AGUA LIMPIA
1300	22:00	10.00	15.41927	66.00	65.20	41.00	98.00	0.376	AGUA LIMPIA
1400	23:00	12.00	16.89096	72.10	71.30	47.10	91.90	0.359	AGUA LIMPIA
1400	00:00	12.00	16.89096	72.78	71.98	47.78	91.22	0.354	AGUA LIMPIA
1400	01:00	12.00	16.89096	73.29	72.49	48.29	90.71	0.350	AGUA LIMPIA
1400	02:00	12.00	16.89096	73.75	72.95	48.75	90.25	0.346	AGUA LIMPIA
1500	03:00	14.00	18.24432	81.65	80.85	56.65	82.35	0.322	AGUA TURBIA
1500	04:00	14.00	18.24432	82.47	81.67	57.47	81.53	0.317	AGUA TURBIA
1500	05:00	14.00	18.24432	83.07	82.27	58.07	80.93	0.314	AGUA TURBIA
1500	06:00	14.00	18.24432	83.63	82.83	58.63	80.37	0.311	AGUA TURBIA
1600	07:00	16.00	19.504	90.83	90.03	65.83	73.17	0.296	AGUA LIMPIA
1600	08:00	16.00	19.504	91.62	90.82	66.62	72.38	0.293	AGUA LIMPIA
1600	09:00	16.00	19.504	92.26	91.46	67.26	71.74	0.290	AGUA LIMPIA
1600	10:00	16.00	19.504	92.79	91.99	67.79	71.21	0.288	AGUA LIMPIA
1700	11:00	19.00	21.25399	100.66	99.86	75.66	63.34	0.281	AGUA LIMPIA
1700	12:00	19.00	21.25399	101.64	100.84	76.64	62.36	0.277	AGUA LIMPIA
1700	13:00	19.00	21.25399	102.31	101.51	77.31	61.69	0.275	AGUA LIMPIA
1700	14:00	19.00	21.25399	102.91	102.11	77.91	61.09	0.273	AGUA LIMPIA
1800	15:00	22.00	22.87047	112.45	111.65	87.45	51.55	0.262	AGUA LIG TURBIA
1800	16:00	22.00	22.87047	113.36	112.56	88.36	50.64	0.259	AGUA LIG TURBIA
1800	17:00	22.00	22.87047	114.24	113.44	89.24	49.76	0.256	AGUA LIG TURBIA
1800	18:00	22.00	22.87047	114.88	114.08	89.88	49.12	0.254	AGUA LIG TURBIA
1900	19:00	25.00	24.38	127.50	126.70	102.50	36.50	0.238	AGUA LIG TURBIA
1900	20:00	25.00	24.38	128.68	127.88	103.68	35.32	0.235	AGUA LIG TURBIA
	21:00								RECUPERACION

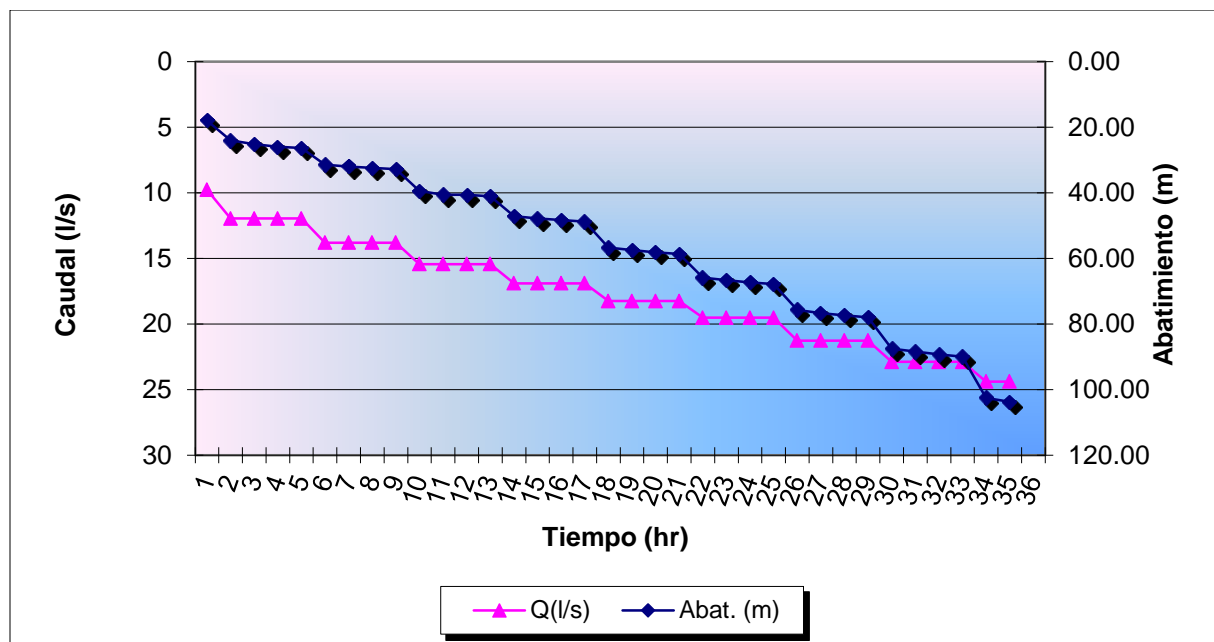


Figura 52. Caudal y abatimiento fase de desarrollo del pozo TC-06. Por IDEAS, (2017).

Durante la prueba de desarrollo se realizó la medición de parámetros tales como conductividad, sólidos disueltos y temperatura, empleando un multiparámetro (Figura 53). Los valores obtenidos se muestran a continuación en la tabla 17. En la figura 54 se muestra de manera gráfica el comparativo de los parámetros conductividad eléctrica; con una variación de 1979.31 a 2089 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y sólidos totales disueltos cuyo valor mínimo fue de 870 y el máximo de 940 ppm. Posteriormente, en la figura 55, se contrasta el pH medido contra valores de temperatura que van de 15.16 a 27.44 $^{\circ}\text{C}$.



Figura 53. Multiparámetro empleado para la medición de pH, temperatura, C.E. y STD.

Tabla 17. Registro de parámetros físicos medidos durante el desarrollo de TC-06. Por IDEAS, (2017).

TIEMPO	STD	T	p.H.	CE
Hrs	(ppm)	(°c)		µs
09:00	INICIO DESARROLLO			
10:00	931.00	23.70	7.69	2053.00
11:00	937.00	24.31	7.65	2083.00
12:00	921.00	25.07	7.72	2047.00
13:00	918.00	24.91	7.66	2039.00
14:00	926.00	24.88	7.61	2060.00
15:00	940.00	24.96	7.62	2089.00
16:00	934.00	26.48	7.71	2075.00
17:00	937.00	26.14	7.77	2082.00
18:00	931.00	25.66	7.70	2067.00
19:00	915.00	24.90	7.81	2033.00
20:00	904.00	24.74	7.74	2008.00
21:00	909.00	24.19	7.60	2024.00
22:00	903.00	23.96	7.63	2008.00
23:00	898.00	24.36	7.84	1996.00
00:00	908.00	24.17	7.76	2020.00
01:00	897.00	24.47	7.69	2000.00
02:00	912.00	15.16	7.65	414.00
03:00	914.00	25.04	7.81	2042.00
04:00	870.00	24.64	7.86	1960.00
05:00	902.00	23.33	7.61	2003.00
06:00	888.00	24.10	7.82	1951.00
07:00	898.00	23.34	7.64	1990.00
08:00	894.00	23.42	7.63	1987.00
09:00	887.00	24.70	7.96	1957.00
10:00	901.00	25.14	7.57	2002.00
11:00	912.00	25.84	7.53	2027.00
12:00	917.00	26.62	7.50	2037.00
13:00	928.00	27.02	7.62	2062.00
14:00	924.00	27.13	7.63	2047.00
15:00	919.00	27.37	7.74	2044.00
16:00	921.00	27.44	7.81	2045.00
17:00	920.00	26.62	7.75	2044.00
18:00	903.00	26.18	7.82	2000.00
19:00	902.00	25.68	7.74	2001.00
20:00	892.00	25.06	7.56	1979.00
21:00	RECUPERACION			

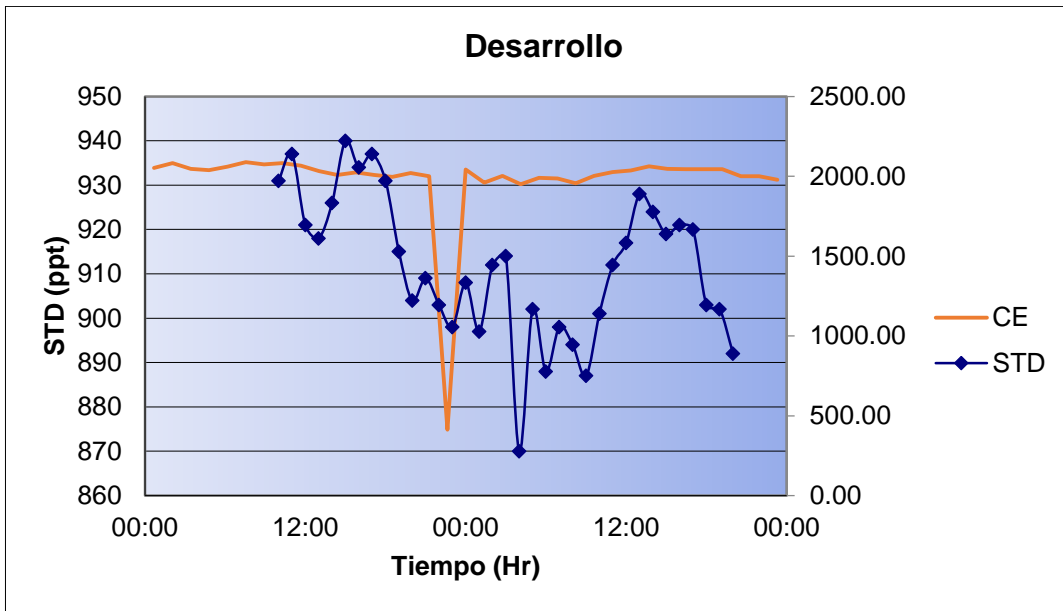


Figura 54. Parámetros de conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos. Por IDEAS, (2017).

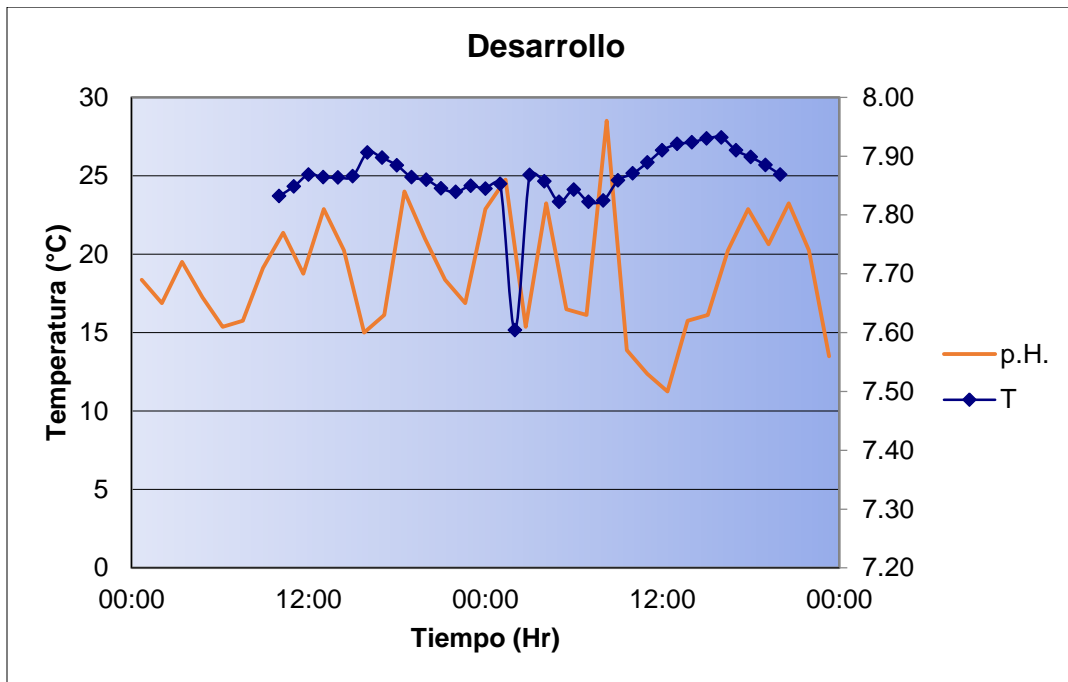


Figura 55. Parámetros de pH y temperatura. Por IDEAS, (2017).

La recuperación del nivel dinámico después de 3 min el nivel fue de 72.68 m (34.02 %), a los 15 min el nivel dinámico fue de 50.88 m (48.37 %), a los 30 min el nivel se encontraba en 46.31 m (53.07 %) y a los 60 min el nivel ya se encontraba en 42.83 m (57.30%), figura 56.

POZO: POZO TC-06
 FECHA: 02/02/2017
 NIVEL DINAMICO: 102.11
 NIVEL ESTATICO: 25.000 24.200
 NIVEL IMPULSORES 164
 BROCAL 0.8

Tiempo (min)	Nivel dinámico (m)	Nivel dinámico corr (m)	abat (m)	% Rec.
3	73.480	72.680	48.480	34.02
5	65.410	64.610	40.410	38.22
7	60.320	59.520	35.320	41.45
10	55.710	54.910	30.710	44.88
15	51.680	50.880	26.680	48.37
20	49.460	48.660	24.460	50.55
25	48.150	47.350	23.150	51.92
30	47.110	46.310	22.110	53.07
35	46.320	45.520	21.320	53.97
40	45.630	44.830	20.630	54.79
50	44.500	43.700	19.500	56.18
60	43.63	42.83	18.63	57.3

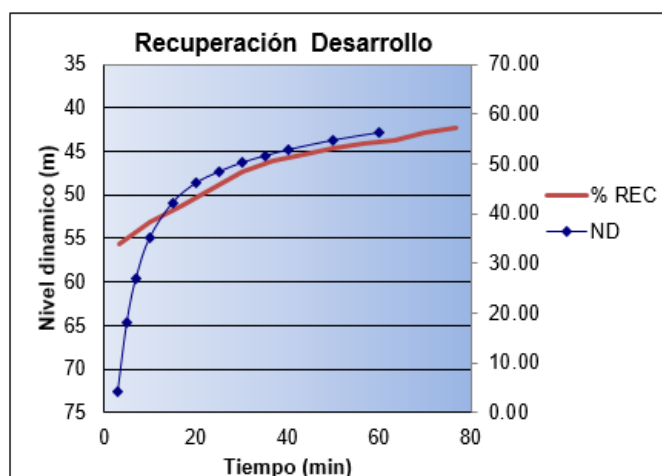


Figura 56. Recuperación del nivel dinámico del pozo TC-06. Por IDEAS, (2017).

7.2.3. Prueba de aforo del pozo

La prueba se realizó del 03 al 04 de febrero, con una duración de 23 horas, el nivel estático inicial fue de 50 m y un nivel dinámico de 147.48 m, obteniendo un caudal máximo de 16.89 LPS, con un nivel dinámico de 147.48 m, un abatimiento de 98.43 m y un caudal específico de 0.227l/s/m (Figura 57). Los resultados de la tabla 18, se pueden observar gráficamente en la figura 58.

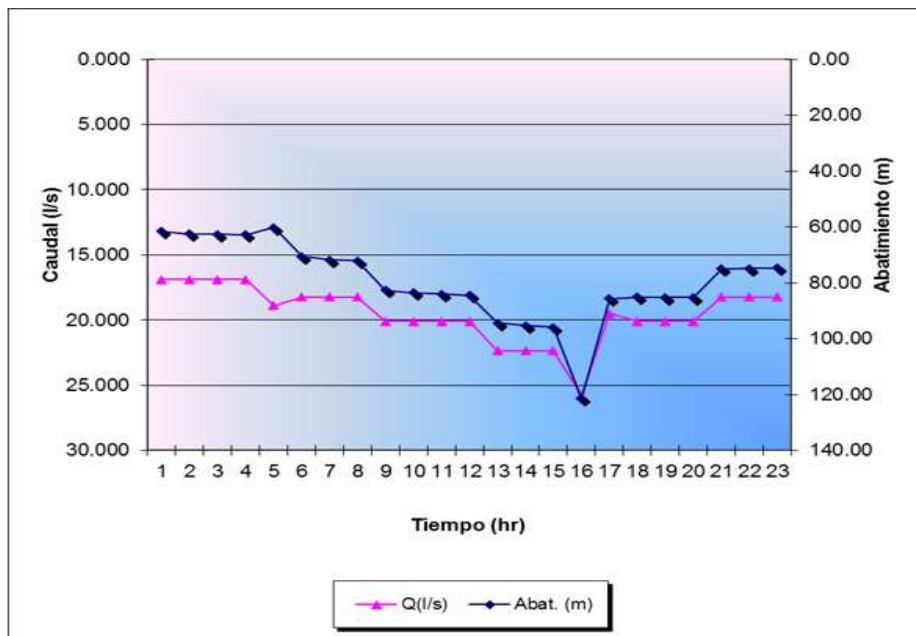


Figura 58. Caudal y abatimiento de la fase aforo pozo TC-06. Por IDEAS, (2017).

La recuperación del nivel dinámico del pozo de bombeo después de 3 min el nivel fue de 63.25 m (37.78 %), a los 15 min el nivel dinámico es de 50.54 m (47.14 %), a los 30 min el nivel se encontraba en 47.20 (50.42 %) y a los 60 min el nivel se encuentra en 44.31 m (53.65 %) ver Figura 59.

REGISTRO DE RECUPERACIÓN DEL AFORO

POZO: POZO TC-06
 FECHA: 03-feb-17
 NIVEL ESTÁTICO: 25
 NIVEL DINAMICO: 98.86
 Brocal: 0.80

Tiempo (min)	Nivel Recup. (m)	Nivel Recup. Corr(m)	% Rec.
3.00	64.05	63.25	37.78
5.00	59.74	58.94	40.51
7.00	56.79	55.99	42.61
10.00	53.96	53.16	44.85
15.00	51.34	50.54	47.14
20.00	49.83	49.03	48.57
25.00	48.79	47.99	49.60
30.00	48.00	47.20	50.42
35.00	47.34	46.54	51.12
40.00	46.80	46.00	51.71
50.00	45.87	45.07	52.76
60.00	45.11	44.31	53.65

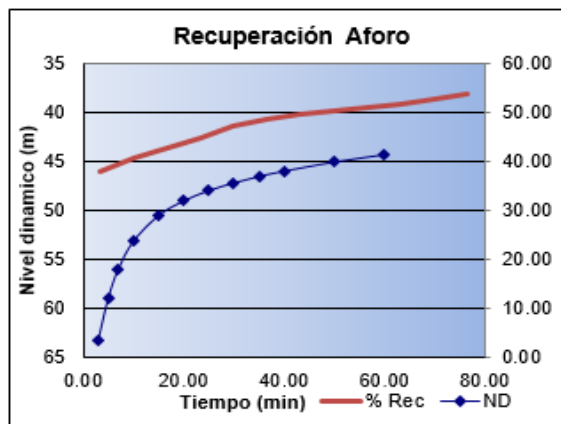


Figura 59. Recuperación del nivel dinámico pozo TC-06. Por IDEAS, (2017).

7.2.4. Prueba de aforo a caudal constante

La prueba se realizó del 4 al 5 de enero, con una duración de 23 horas, el nivel estático inicial fue de 24.2 m y un nivel dinámico máximo de 98.90 m, el bombeo se realizó a 1600 RPM, obteniendo un caudal promedio de 18.24 l/s, con un nivel dinámico promedio de 98.267 m, un abatimiento de 74.067. (Tabla 19, Figura 60).



Figura 60. Prueba de aforo a caudal constante a 1600 RPM

Tabla 19. Datos prueba de aforo a caudal constante TC-06. Por IDEAS, (2017).

POZO DE BOMBEO TC-06									
N.E. (m)	25	24.2	FECHA		04/02/2017				
N.D.(m)	98.9	BROCAL		0.8			25.27	1.14	
R.P.M.	1600	CAUDAL CONSTANTE			NP	Gasto (l/s)	POZO DE OBSERVACION TC-06		
TIEMPO	N.D.	N.D. CORR	ABAT	OBS			N.D.	N.D. CORR	ABATIMIENTO
min	(m)	(m)	(m)			(m)	(m)	(m)	
60.00	96.180	95.380	71.18	agua limpia	15	18.8846668	75.22	74.08	50.22
120.00	97.350	96.550	72.35	agua limpia	14	18.24432142	76.27	75.13	51.27
180.00	97.910	97.110	72.91	agua limpia	14	18.24432142	76.78	75.64	51.78
240.00	98.220	97.420	73.22	agua limpia	14	18.24432142	77.07	75.93	52.07
300.00	98.390	97.590	73.39	agua limpia	14	18.24432142	77.26	76.12	52.26
360.00	98.570	97.770	73.57	agua limpia	14	18.24432142	77.4	76.26	52.4
420.00	98.640	97.840	73.64	agua limpia	14	18.24432142	77.52	76.38	52.52
480.00	98.750	97.950	73.75	agua limpia	14	18.24432142	77.63	76.49	52.63
540.00	98.820	98.020	73.82	agua limpia	14	18.24432142	77.78	76.64	52.78
600.00	98.930	98.130	73.93	agua limpia	14	18.24432142	77.81	76.67	52.81
660.00	99.000	98.200	74.00	agua limpia	14	18.24432142	77.87	76.73	52.87
720.00	99.050	98.250	74.05	agua limpia	14	18.24432142	77.93	76.79	52.93
780.00	99.080	98.280	74.08	agua limpia	14	18.24432142	78	76.86	53
840.00	99.110	98.310	74.11	agua limpia	14	18.24432142	78.05	76.91	53.05
900.00	99.180	98.380	74.18	agua limpia	14	18.24432142	78.1	76.96	53.1
960.00	99.250	98.450	74.25	agua limpia	14	18.24432142	78.17	77.03	53.17
1020.00	99.280	98.480	74.28	agua limpia	14	18.24432142	78.22	77.08	53.22
1080.00	99.340	98.540	74.34	agua limpia	14	18.24432142	78.28	77.14	53.28
1140.00	99.450	98.650	74.45	agua limpia	14	18.24432142	78.34	77.2	53.34
1200.00	99.500	98.700	74.50	agua limpia	14	18.24432142	78.44	77.3	53.44
1260.00	99.530	98.730	74.53	agua limpia	14	18.24432142	78.47	77.33	53.47
1320.00	99.550	98.750	74.55	agua limpia	14	18.24432142	78.52	77.38	53.52
1380.00	99.700	98.900	74.70	agua limpia	14	18.24432142	78.59	77.45	53.59
				RECUPERACIÓN					

En la tabla 19 se observan los datos del pozo TC-06 en la etapa de caudal constante, de igual forma, se monitoreó el pozo de observación TC-06. En las figuras 61 y 62, es posible ver gráficamente el abatimiento de ambos pozos.

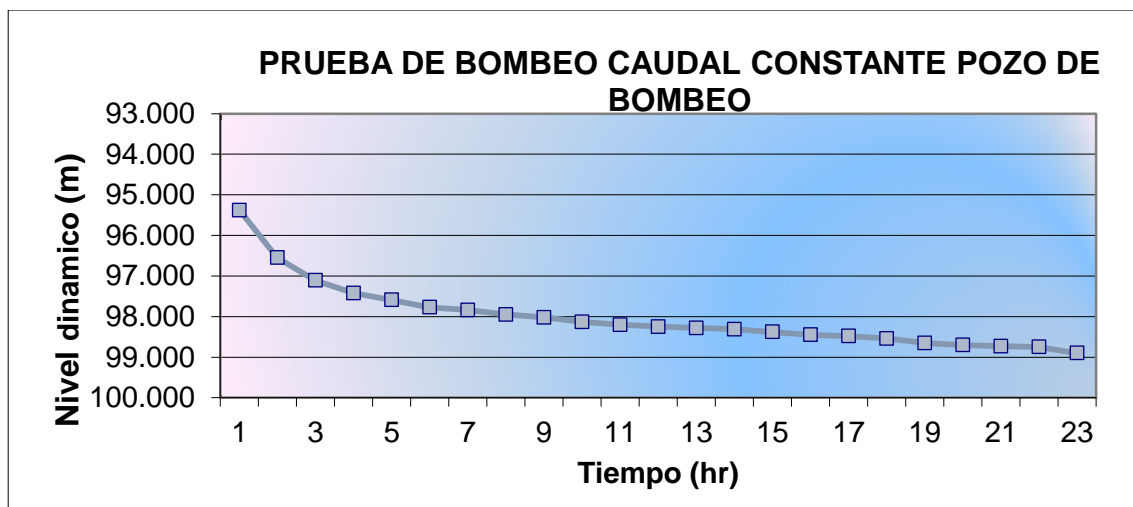


Figura 61. Evolución del nivel dinámico pozo TC-06, etapa caudal constante. Por IDEAS, (2017).

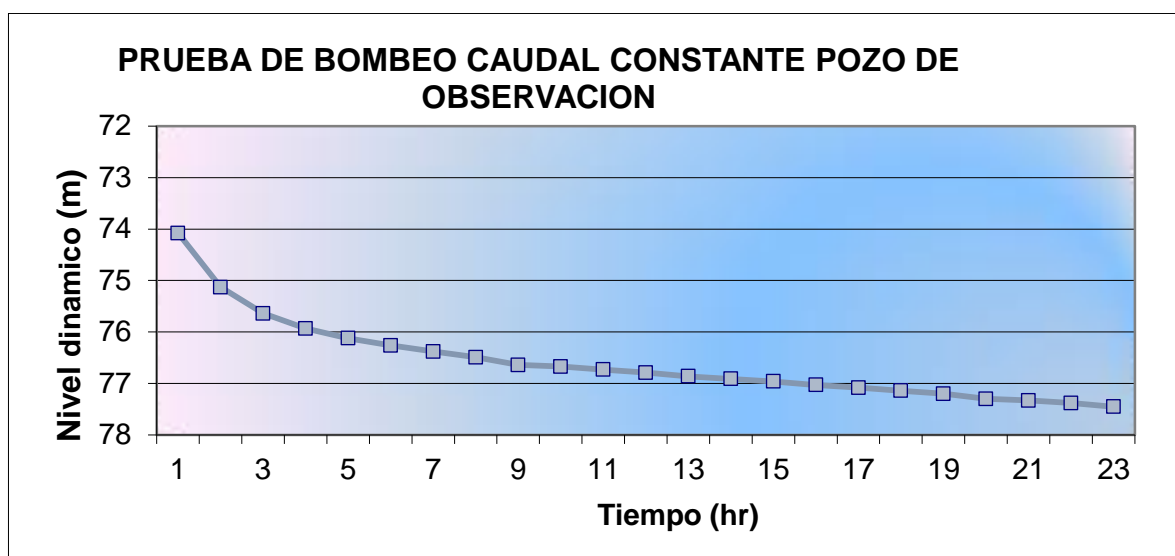


Figura 62. Evolución nivel dinámico del pozo de observación TC-06, etapa caudal constante. Por IDEAS, (2017).

La recuperación del nivel dinámico del pozo de bombeo después de 6 min fue de 62.27 m (38.25%), a los 15 min el nivel dinámico es de 50.60 m (47.08 %), a los 30 min el nivel se encontraba en 47.27 (50.34 %) y a los 60 min el nivel se encuentra en 44.5 m (53.42 %) ver Figura 63.

POZO: POZO TC-06
 FECHA: 04-feb-17
 NIVEL ESTÁTICO: 25 24.20
 NIVEL DINÁMICO: 98.90
 Brocal: 0.80

TIEMPO (min)	REC N.D. (m)	REC CORR N.D. (m)	Abat Residual (m)	% Rec.
3	63.27	62.47	38.27	38.25
6	59.40	58.60	34.40	40.74
7	56.50	55.70	31.50	42.83
10	53.30	52.50	28.30	45.40
15	51.40	50.60	26.40	47.08
20	49.83	49.03	24.83	48.57
25	48.83	48.03	23.83	49.56
30	48.07	47.27	23.07	50.34
35	47.5	46.70	22.50	50.95
40	46.9	46.10	21.90	51.60
50	46	45.20	21.00	52.61
60	45.3	44.5	20.3	53.4216

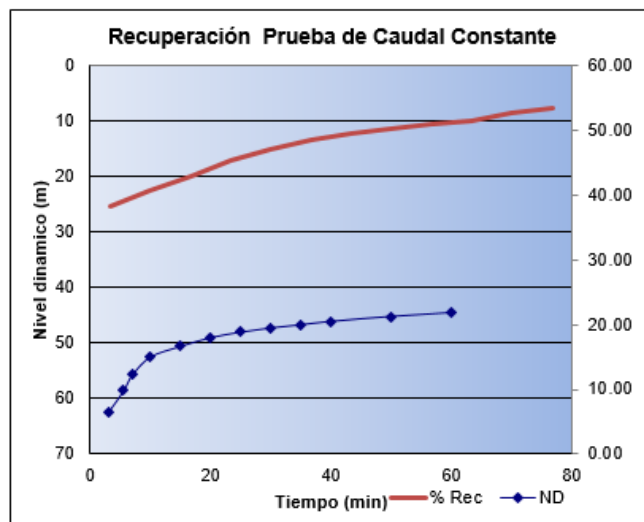


Figura 63. Recuperación del nivel dinámico del pozo de bombeo TC-06. Por IDEAS, (2017).

La recuperación del nivel dinámico del pozo de observación después de 3 min fue de 64.36 m (36.84 %), a los 15 min el nivel dinámico es de 54.73 m (43.19 %), a los 30 min el nivel se encontraba en 51.56 (45.79 %) y a los 60 min el nivel se encuentra en 48.63 m (48.48 %) ver Figura 64.

POZO: POZO TC-06 OBS
 FECHA: 04-feb-17
 NIVEL ESTÁTICO: 25.27 24.13
 NIVEL DINÁMICO: 77.45
 Brocal: 1.14

TIEMPO (min)	REC N.D. (m)	REC CORR N.D. (m)	Abat Residual (m)	% Rec.
3	65.50	64.36	40.23	36.84
5	62.30	61.16	37.03	38.73
7	60.22	59.08	34.95	40.07
10	58.06	56.92	32.79	41.56
15	55.87	54.73	30.60	43.19
20	54.47	53.33	29.20	44.30
25	53.45	52.31	28.18	45.14
30	52.70	51.56	27.43	45.79
35	52.04	50.90	26.77	46.37
40	51.47	50.33	26.20	46.88
50	50.54	49.40	25.27	47.74
60	49.77	48.63	24.50	48.48

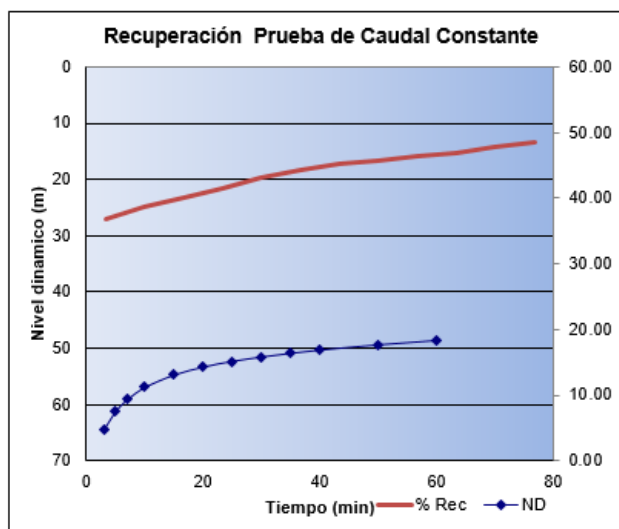


Figura 64. Recuperación del nivel dinámico del pozo de observación TC-06. Por IDEAS, (2017).

7.3. Interpretación de resultados

7.3.1. Prueba de aforo

Una vez realizado la limpieza y rehabilitación del pozo, se realizó la prueba de aforo para conocer el caudal óptimo de bombeo. Esto consistió en instalar una bomba vertical tipo turbina, con motor de combustión interna de 350 a 400 HP; para un gasto de hasta 30 litros por segundo, y un nivel dinámico de 160 metros; los diámetros de la columna de la bomba serán determinados en cuanto a la eficiencia piezométrica, de acuerdo al caudal hipotético a extraer y los niveles dinámicos.

La prueba de aforo, consistió en bombear el pozo en diferentes etapas, variando las revoluciones por minuto que genera el motor conectado a la bomba, esto se realizó durante 24 horas. La prueba de aforo permitió determinar los niveles de abatimiento y el caudal óptimo del pozo. Así mismo se obtuvo la recuperación del nivel dinámico del pozo, después de haber concluido la prueba de aforo.

Los datos obtenidos en la prueba de aforo fueron interpretados por medio del software Aquitest, empleando el método de recuperación de Theis & Jacob.

7.3.1.1. Transmisividad (T)

La transmisividad se define como el caudal que pasa a través de una franja vertical de terreno de ancho unidad y altura igual a la del espesor saturado, bajo un gradiente unidad. Este término utilizado en hidrogeología fue propuesto por Theis (1935) para indicar la capacidad de un acuífero para dejar pasar el agua a través de él, no por unidad de área, sino por unidad de prisma de base unitaria y espesor saturado. Se expresa como el producto de la conductividad hidráulica por el espesor de la porción saturada del acuífero, es decir:

$$T = K b$$

donde:

T = Transmisividad, (Área/Tiempo)

K = Conductividad Hidráulica (longitud/tiempo)

b = Espesor saturado del acuífero (longitud)

El valor de transmisividad obtenido en la etapa de aforo fue de $2.55 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($22.03 \text{ m}^2/\text{dia}$), y en la etapa de recuperación se obtuvo un valor de $3.47 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($29.98 \text{ m}^2/\text{dia}$), por otra parte en el pozo de observación TC-06 fue de $9.24 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($79.83 \text{ m}^2/\text{dia}$), y en la etapa de recuperación se obtuvo una valor de $4.02 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($34.73 \text{ m}^2/\text{dia}$), (valores que hablan de la existencia de un acuífero *de tipo semiconfinado* para el área de la prueba).

El valor de transmisividad obtenido en la etapa de prueba de caudal constante de $2.53 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($21.86 \text{ m}^2/\text{dia}$), y en la etapa de recuperación se obtuvo una valor de $3.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($29.46 \text{ m}^2/\text{dia}$), en el pozo de observación TC-06 fue de $9.24 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($79.83 \text{ m}^2/\text{dia}$), y en la etapa de recuperación se obtuvo un valor de $3.41 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($29.46 \text{ m}^2/\text{dia}$), se midió el mismo parámetro en otro pozo de observación, TC-04 fue de $1.77 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ($1529 \text{ m}^2/\text{dia}$). En la tabla 20 se detallan los valores de transmisividad.

Tabla 20. Valores de transmisividad (T) obtenidos. Por IDEAS, (2017).

ETAPA	POZO TC-06	POZO DE OBS. TC-06	POZO DE OBS. TC-04
Aforo	$2.55 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($22.03 \text{ m}^2/\text{dia}$)	$9.24 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($79.83 \text{ m}^2/\text{dia}$),	
Recuperación	$3.47 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($29.98 \text{ m}^2/\text{dia}$)	$4.02 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($34.73 \text{ m}^2/\text{dia}$)	
Caudal constante	$2.53 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($21.86 \text{ m}^2/\text{dia}$)	$9.24 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($79.83 \text{ m}^2/\text{dia}$)	$1.77 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ($1529 \text{ m}^2/\text{dia}$).
Recuperación	$3.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($29.46 \text{ m}^2/\text{dia}$)	$3.41 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($29.46 \text{ m}^2/\text{dia}$)	

7.3.1.2. Conductividad hidráulica (K)

La conductividad hidráulica (K) mide la facilidad con que un fluido se mueve a través de un medio poroso, por lo cual, su valor depende tanto de las propiedades del medio (permeabilidad del acuífero), como de las del fluido (densidad y viscosidad). Este parámetro se obtuvo a partir de las transmisividad que resulta de la interpretación de las pruebas de bombeo (Tabla 21).

Tabla 21. Valores de conductividad hidráulica (K) obtenidos. Por IDEAS, (2017).

ETAPA	POZO TC-06	POZO DE OBS. TC-06	POZO DE OBS. TC-04
Aforo	2.55 x 10 ⁻⁶ m/s (0.22 m/día)	9.24 x 10 ⁻⁶ m/s (0.80 m/día)	
Recuperación	3.47 x 10 ⁻⁶ m/s (0.30 m/día)	4.02 x 10 ⁻⁶ m ² /s (0.42 m/día)	
Caudal constante	2.53 x 10 ⁻⁶ m/s (0.22 m/día)	9.24 x 10 ⁻⁶ m/s (0.80 m/día)	1.77 x 10 ⁻⁴ m ² /s (15.29 m ² /día)
Recuperación	3.41 x 10 ⁻⁶ m/s (0.29 m/día)	3.76 x 10 ⁻⁶ m/s (0.32 m/día)	

En el sitio, el valor de conductividad hidráulica calculado en la etapa la etapa de aforo fue de **2.55 x 10⁻⁶ m/s (0.22 m/día)**, y en la etapa de recuperación se obtuvo una valor de **3.47 x 10⁻⁶ m/s (0.30 m/día)**, en el pozo de observación TC-06 fue de **9.24 x 10⁻⁶ m/s (0.80 m/día)**, y en la etapa de recuperación se obtuvo una valor de **4.02 x 10⁻⁶ m²/s (0.42 m/día)**. El valor de conductividad hidráulica obtenido en la etapa de prueba de caudal constante fue de **2.53 x 10⁻⁶ m/s (0.22 m/día)**, y en la etapa de recuperación se obtuvo un valor de **3.41 x 10⁻⁶ m/s (0.29 m/día)**, en el pozo de observación TC-04 fue de **1.77 x 10⁻⁴ m²/s (15.29 m²/día)**, mientras que en el pozo de observación TC-06 fue de **9.24 x 10⁻⁶ m/s (0.80 m/día)**, y en la etapa de recuperación se obtuvo un valor de **3.76 x 10⁻⁶ m/s (0.32 m/día)**.

7.3.1.3. Coeficiente de almacenamiento (S)

Es adimensional y hace referencia al volumen que es capaz de liberar el acuífero al descender en una unidad el nivel piezométrico (o la presión). Se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero, de sección igual a la unidad y altura la del espesor saturado, si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico. Toma valores diferentes según sea el acuífero libre o cautivo. En un acuífero libre el valor del coeficiente de almacenamiento coincide con el valor de la porosidad eficaz. En un acuífero cautivo, sin embargo, este volumen de agua que causa un descenso de una unidad en el nivel piezométrico, coincide con la suma del agua liberada por el acuífero como consecuencia de la dilatación que ésta sufre al descomprimirse y el agua que cede el terreno al compactarse el armazón por tener que soportar en mayor parte el peso del terreno suprayacente.

En el sitio el valor del coeficiente de almacenamiento (S) calculado en la etapa de aforo es de 3.84×10^{-14} , mientras que en la etapa de la prueba de caudal constante es de 2.15×10^{-14} . Para el aprovechamiento TC-04 ubicado a 555 m del pozo de bombeo fue de 6.90×10^{-7} en la misma etapa (Tabla 22, Figura 65 y 66).

Tabla 22. Valores de coeficiente de almacenamiento (S) obtenidos. Por IDEAS, (2017).

ETAPA	POZO TC-06	POZO DE OBS. TC-04
Aforo	3.84×10^{-14}	
Caudal constante	2.15×10^{-14}	6.90×10^{-7}

HIDROGEOLOGOS CONSULTORES Quinta Amalia # 20, Col. Las Quintas. Tel: (662)2184369 direccion@ideasenagua.com IDEAS S.C. Hermosillo, Sonora, México		Pumping Test Analysis Report						
Location: CANANEA		Pumping Test: AFORO TC-06			Pumping Well: TC-06			
Test Conducted by:					Test Date: 01/02/2017			
Aquifer Thickness: 100.00 m		Discharge: variable, average rate 19.479 [l/s]						
Analysis Name	Analysis Performed by	Analysis Date	Method name	Well	T [m ² /s]	K [m/s]	S	
1 AFORO TC-06	IDEAS	11/07/2016	Theis	TC-06	2.55×10^{-4}	2.55×10^{-5}		
2 AFORO TC-06	IDEAS	11/07/2016	Theis	OBS TC-06	9.24×10^{-4}	9.24×10^{-5}	3.84×10^{-14}	
3 REC. AFORO TC-06	IDEAS	08/11/2016	Theis Recovery	TC-06	3.47×10^{-4}	3.47×10^{-5}		
4 REC. AFORO TC-06	IDEAS	08/11/2016	Theis Recovery	OBS TC-06	4.02×10^{-4}	4.02×10^{-5}		
Average					4.82×10^{-4}	4.82×10^{-5}	3.84×10^{-14}	

Figura 65. Método de Theis para la prueba de aforo del pozo TC-06. Por IDEAS, (2017).

HIDROGEOLOGOS CONSULTORES Quinta Amalia # 20, Col. Las Quintas. Tel: (662)2184369 direccion@ideasenagua.com IDEAS S.C. Hermosillo, Sonora, México		Pumping Test Analysis Report						
Location: CANANEA		Pumping Test: PCC TC-06			Pumping Well: TC-06			
Test Conducted by:					Test Date: 03/02/2017			
Aquifer Thickness: 100.00 m		Discharge: variable, average rate 18.233 [l/s]						
Analysis Name	Analysis Performed by	Analysis Date	Method name	Well	T [m ² /s]	K [m/s]	S	
1 PCC TC-06	IDEAS	06/02/2017	Theis	TC-06	2.53×10^{-4}	2.53×10^{-5}		
2 PCC TC-06	IDEAS	06/02/2017	Theis	OBS TS-06	9.24×10^{-4}	9.24×10^{-5}	2.15×10^{-14}	
3 PCC TC-06	IDEAS	06/02/2017	Theis	OBS TC-04	1.77×10^{-2}	1.77×10^{-4}	6.90×10^{-7}	
4 REC. PCC TC-06	IDEAS	06/02/2017	Theis Recovery	TC-06	3.41×10^{-4}	3.41×10^{-5}		
5 REC. PCC TC-06	IDEAS	06/02/2017	Theis Recovery	OBS TS-06	3.76×10^{-4}	3.76×10^{-5}		
Average					3.92×10^{-3}	3.92×10^{-5}	3.45×10^{-7}	

Figura 66. Método de Theis para la prueba caudal constante del pozo TC-06. Por IDEAS, (2017).

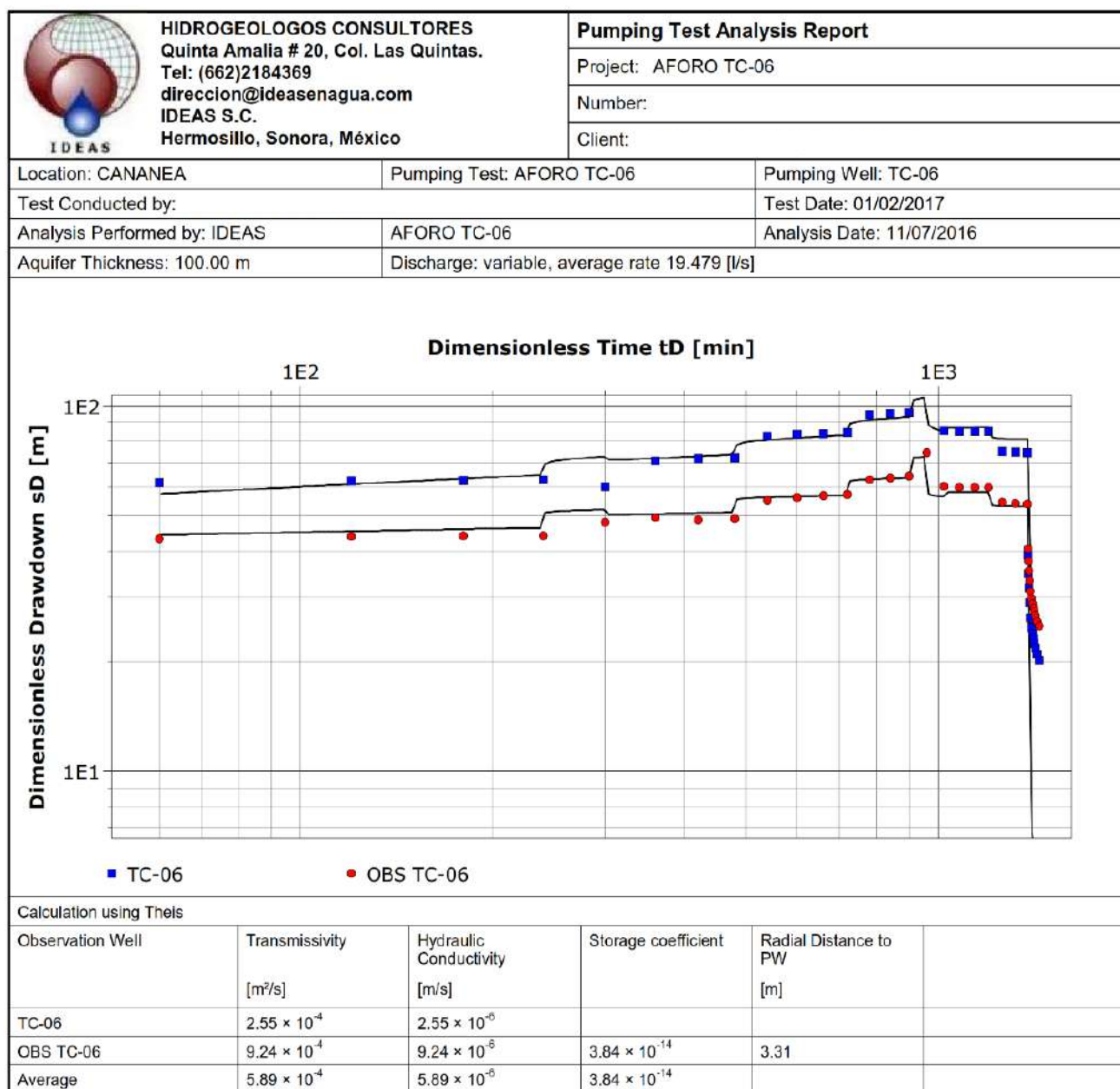


Figura 67. Obtención de transmisividad, conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento mediante Método de Theis para la etapa de aforo del pozo TC-06 y del pozo de observación TC-06. Por IDEAS, (2017).

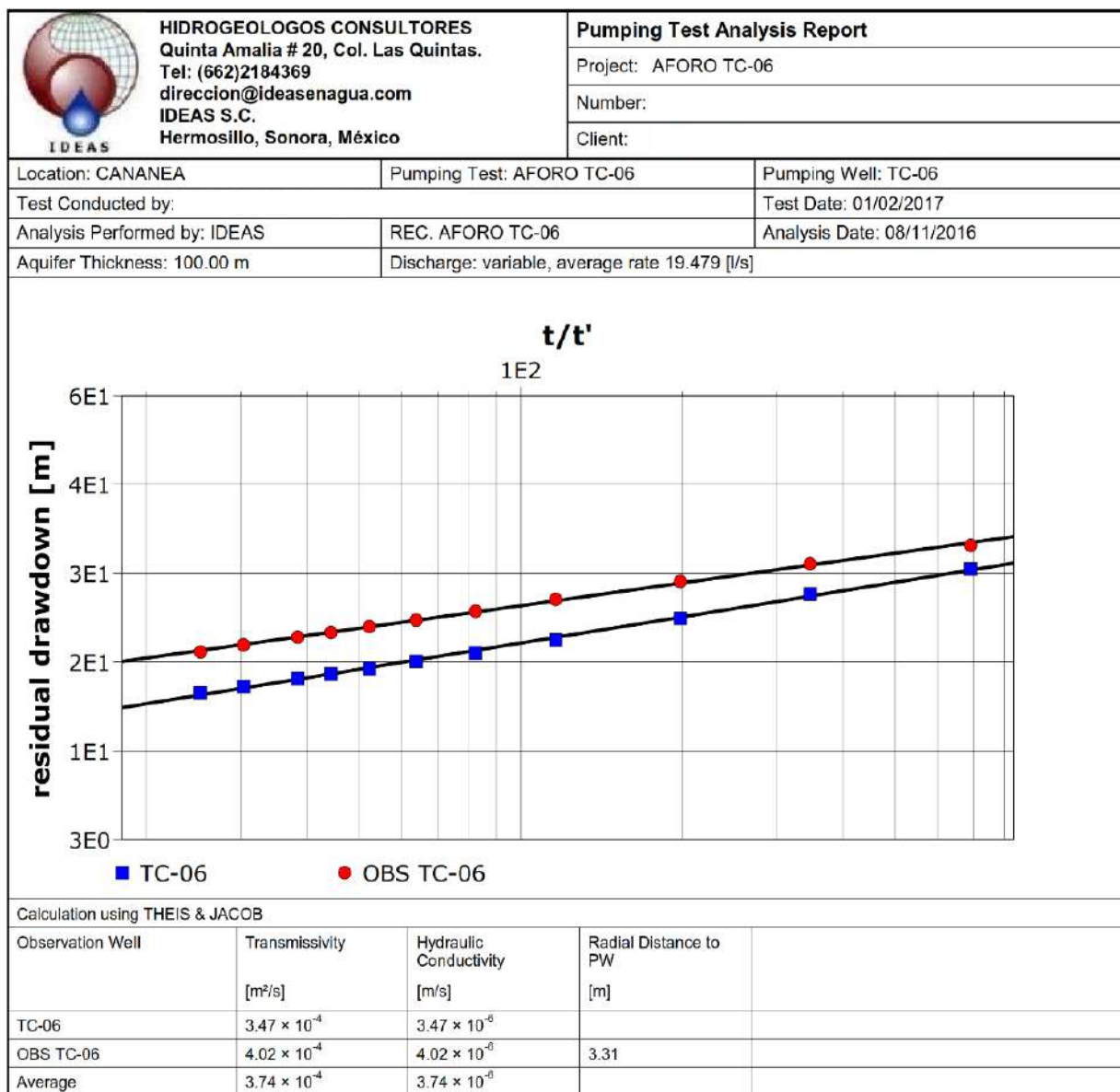


Figura 68. Obtención de transmisividad y conductividad hidráulica mediante Método de Theis para la etapa de recuperación del pozo TC-06 y del pozo de observación TC-06. Por IDEAS, (2017).

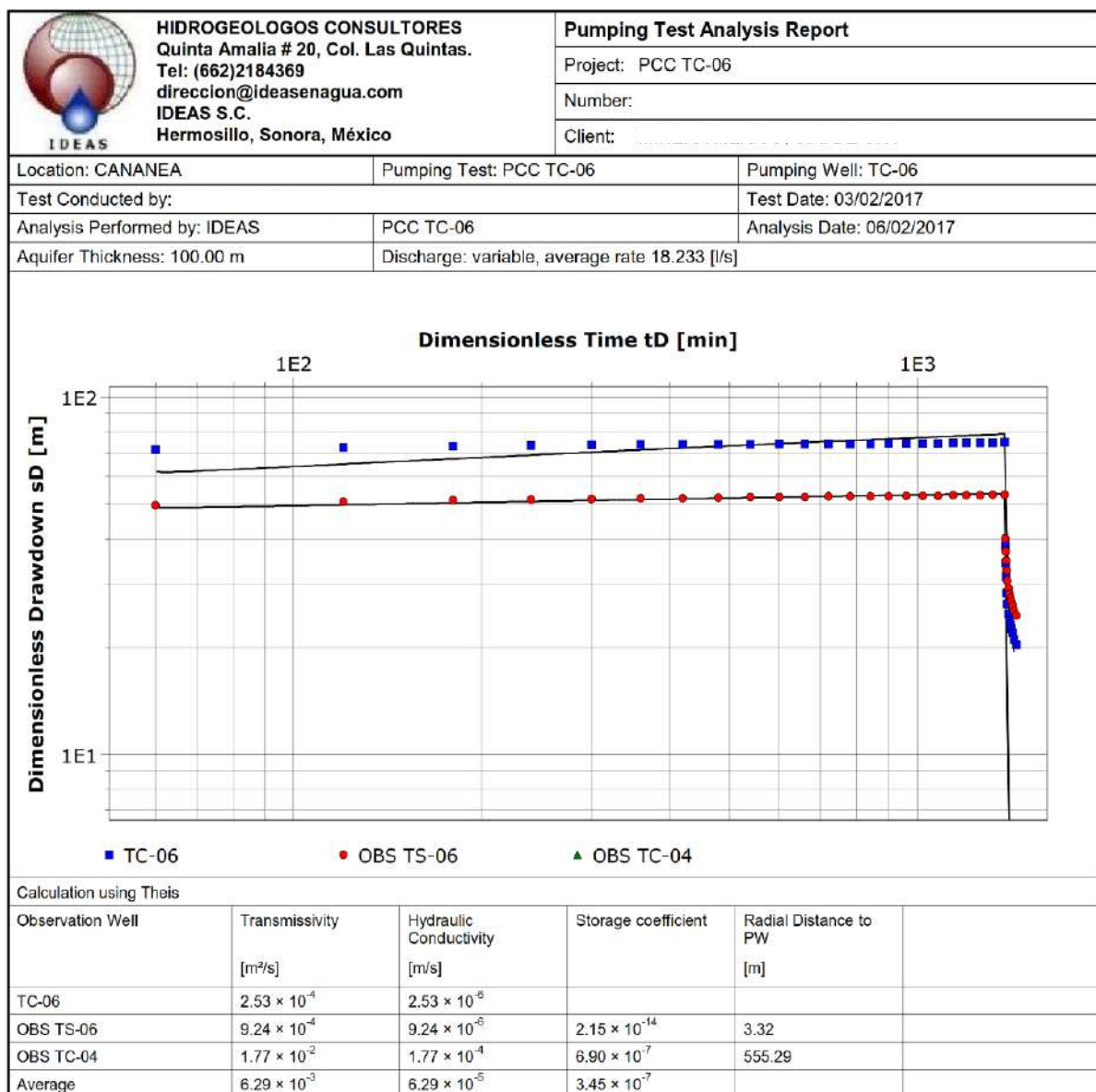


Figura 69. Obtención de transmisividad, conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento mediante Método de Theis para la etapa de bombeo caudal constante del pozo TC-06 y de los pozos de observación TC-06 y TC-04. Por IDEAS, (2017).

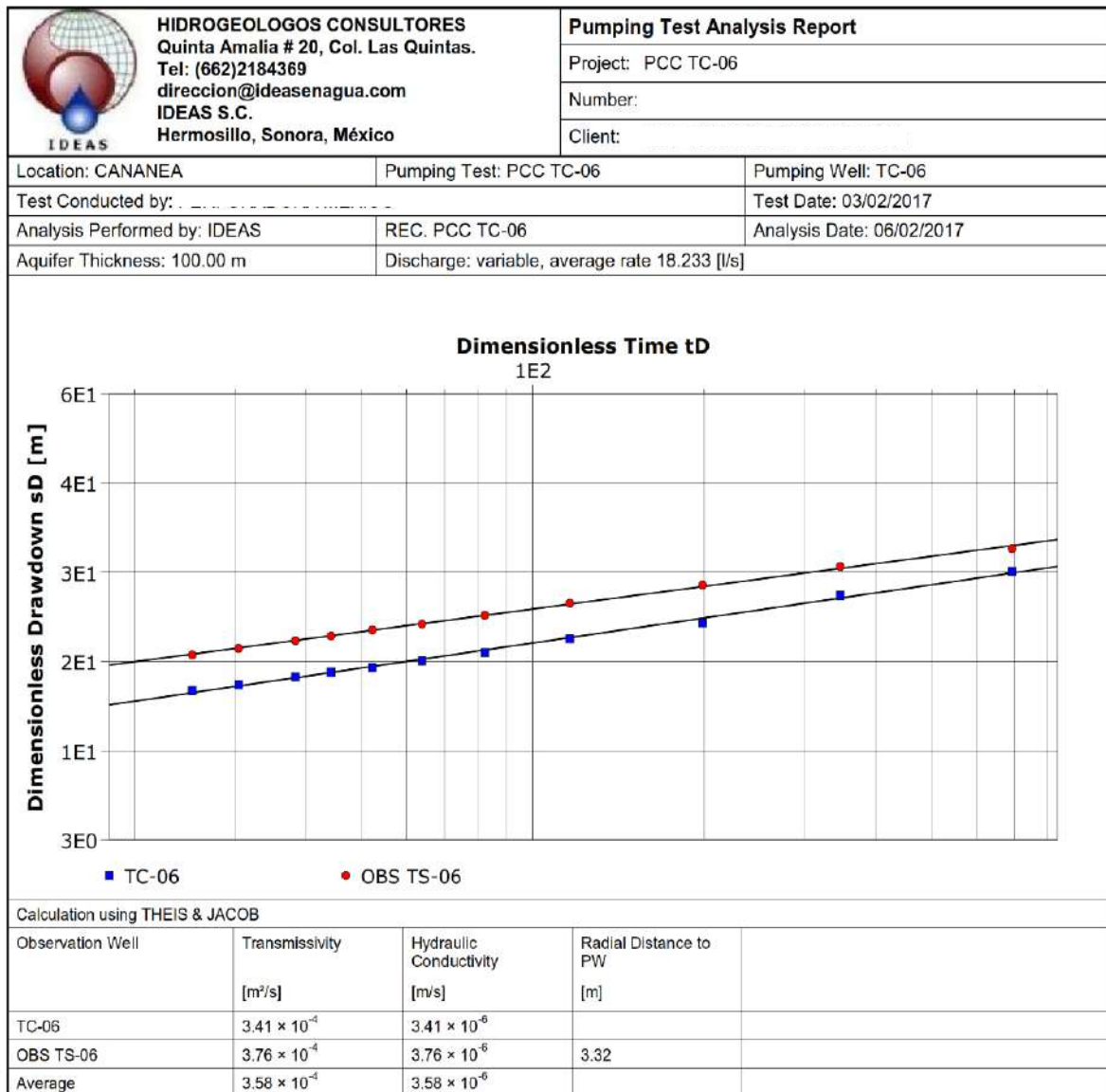


Figura 70. Obtención de transmisividad y conductividad hidráulica mediante Método de Theis para la etapa de recuperación del pozo TC-06 y del pozo de observación TC-06. Por IDEAS, (2017).

7.3.1.4. Radio de influencia teórico

Desde que un acuífero homogéneo fue modelado, existe un interés en comparar los resultados con una solución analítica. Algunas fórmulas dan el valor de reducción en el pozo para un flujo estable en acuíferos confinados y no confinados, homogéneos, isotrópicos e infinitos en la extensión horizontal con un solo pozo de penetración.

El radio de influencia está definido como la máxima distancia en la cual las reducciones pueden ser detectadas con los instrumentos de medición usuales en el campo, la manera más común de encontrar el radio de influencia es el uso de fórmulas empíricas. Estas fórmulas se encuentran listadas abajo.

Author	Reference	Formula	Radius of Influence
Lembke	(1886, 1887)	$R = h_o \times \sqrt{\frac{K}{2N}}$	
Weber	[Kyrieleis-Sichardt, 1930]	$R = 3 \times \sqrt{\frac{h_o \times K \times t}{n_e}}$	
Kusakin	Chertusov, 1949	$R = 575 \times s_w \times \sqrt{K \times h_o}$	
Kusakin	Aravin and Numerov, 1953	$R = 1,9 \times \sqrt{\frac{h_o \times K \times t}{n_e}}$	
Sichardt	[Kyrieleis-Sichardt, 1930]	$R = 3000 \times s_w \times \sqrt{K}$	

Figura 71. Fórmulas empíricas para la determinación del radio de influencia. Por IDEAS, (2017).

Dónde:

N = Recarga de agua subterránea

ho = Espesor del acuífero saturado

K = Conductividad hidráulica

ne = Porosidad efectiva

sw = Abatimiento del pozo

t = Tiempo

La tabla 23 muestra los resultados del radio de influencia a diferentes caudales, utilizando una conductividad hidráulica promedio de 3.92×10^{-5} m/s y un espesor saturado de 100 m.

Tabla 23. Caudal y radio de influencia calculado por la fórmula de Sichardt. Por IDEAS, (2017).

R.P.M.	GASTO		Abat.	Radio de influencia	caudal específico	OBSERVACIONES
Cabezal	Q(l/s)	m	(m)	Ro	(l/s/m)	
1500	16.891	87.02	62.82	1179.946	0.269	AGUA LIMPIA
1600	18.244	96.35	72.15	1355.191	0.253	AGUA LIMPIA
1700	20.104	108.74	84.54	1587.912	0.238	AGUA LIMPIA
1800	22.345	120.07	95.87	1800.723	0.233	AGUA LIMPIA
2000	25.801	145.70	121.50	2282.131	0.212	AGUA LIMPIA

Para un caudal de **18 l/s** se tiene un radio de influencia de **1355 m**, lo cual representa una intercepción de conos de abatimientos con respecto al pozo más cercano **TC-04** localizado a **555 m** de este, por lo cual se concluye que se tiene la presencia de un acuífero semiconfinado con un coeficiente de almacenamiento bajo de **3.84×10^{-14}** en la etapa de aforo, y de **2.14×10^{-14}** en la etapa de bombeo a caudal constante.

Para el aprovechamiento TC-04 fue de **6.90×10^{-7}** , también en la etapa de caudal constante, por lo que, en la figura 72 mostrada a continuación, se observa el descenso en el nivel dinámico producto de la influencia del pozo TC-06 en el aprovechamiento TC-04, lo que afecta sustancialmente los gastos de ambos pozos al estar bombeando simultáneamente.

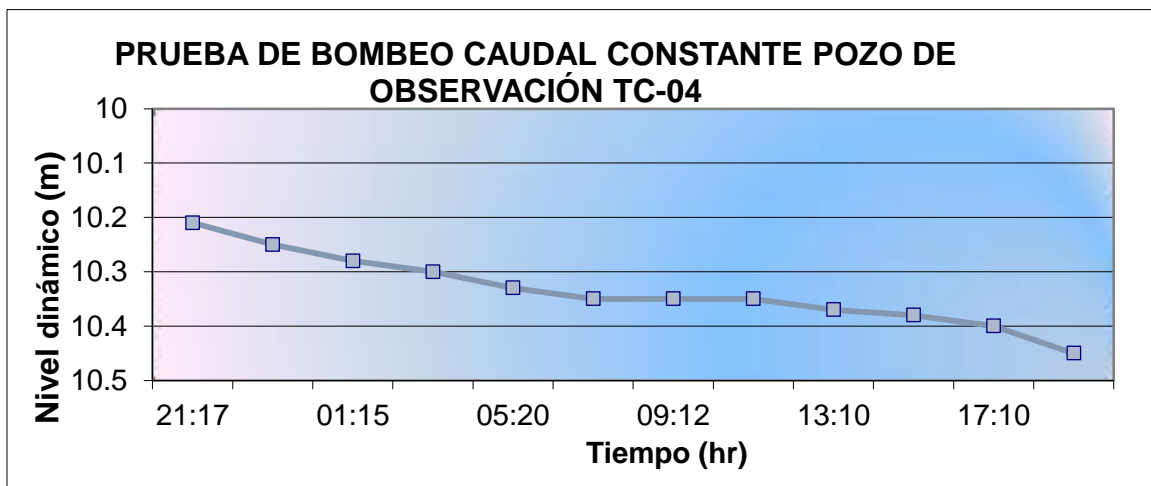


Figura 72. Descenso en el nivel dinámico de pozo observatorio TC-04. Por IDEAS, (2017).

7.4. Conclusiones y discusiones

Todos los métodos de perforación provocan alteraciones en los acuíferos creando una zona de perturbación que en lo fundamental se caracteriza por tener una permeabilidad baja que, de no modificarse, provocará pérdidas de carga que se traducirán en último término en una menor eficiencia del pozo reduciendo considerablemente la cantidad de agua que se podría extraer normalmente del pozo. También reducirá su *gasto específico*, es decir, la cantidad de agua expresada en litros por segundo por cada metro de depresión del nivel.

El desarrollo del pozo, una tarea difícil y ardua, tiene como finalidad restituir las condiciones naturales de los terrenos atravesados de forma tal que las pérdidas de carga solamente sean las que se provocan en el acuífero, es decir, las que son inevitables y dependen de sus características hidrogeológicas. La etapa de desarrollo tiene como objetivo un ordenamiento del material que se emplea como filtro de grava provocando una gradación de mayor a menor tamaño en la medida que nos alejamos del pozo, lo que se traduce en una mejoría de su porosidad efectiva y, consecuentemente, de su permeabilidad.

Finalmente, el desarrollo tiene que lograr que se extraiga desde el acuífero y del filtro de grava, toda la arena y materiales más finos de forma tal que cuando el pozo entre en producción el agua salga exenta de partículas finas abrasivas que dañen la bomba, reacomoden el filtro de grava y permitan en consecuencia incrementar la vida útil del pozo.

La figura 73 muestra los resultados de eficiencia en bombeo, en base a ella se recomienda que el caudal máximo a extraer no pase de 10 l/s, puesto que la eficiencia del pozo tendría a caer por debajo de 66.4%, afectando su vida útil, un notable detrimento del gasto y aumentaría las posibilidades de abatimiento futuro.

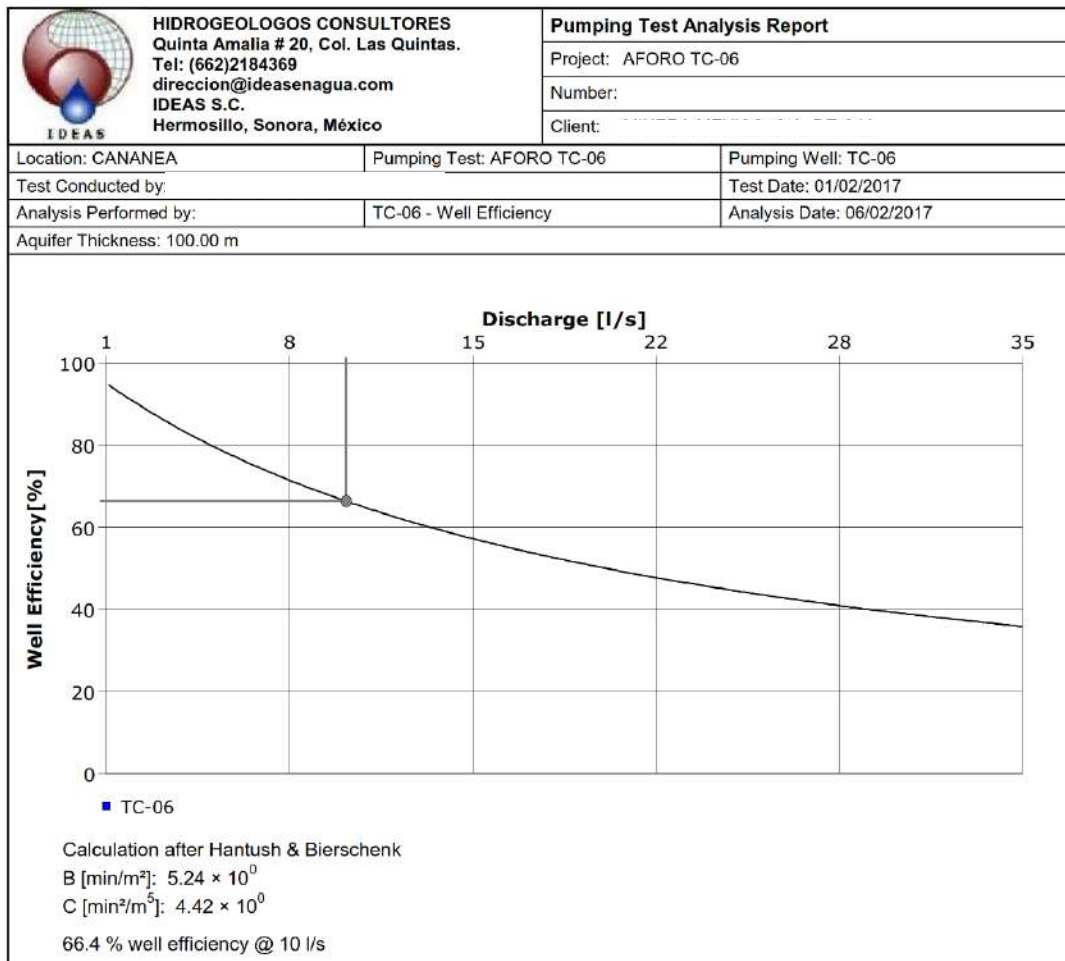


Figura 73. Eficiencia de bombeo en pozo TC-06. Por IDEAS, (2017).

Los datos obtenidos en la prueba de bombeo son los siguientes:

1.- El nivel estático durante la etapa de aforo fue de 24.2 m, obteniendo un **caudal máximo de 25.80 LPS a 2000 RPM**, con un nivel dinámico de **145.70m**, un **abatimiento de 121.50 m** y un **caudal específico de 0.212 l/s/m**. Durante esta misma etapa se tomaron los pasos de 1500 RPM a 2000 RPM, los cuales se muestran en la Tabla 24 y, gráficamente en la Figura 74.

Tabla 24. Registro de datos de prueba de aforo pozo TC-06. Por IDEAS, (2017).

TIEMPO (hr)	R.P.M. Cabezal	TIEMPO Hrs:min	N.P. (cm)	CAUDAL Q(l/s)	N.D. (m)	N.D. corr (m)	ABATIMIENTO (m)	Caudal Específico (l/s/m)	OBSERVACIONES
4	1500	01:00	12.00	16.891	87.82	87.02	62.82	0.269	AGUA LIMPIA
8	1600	05:00	14.00	18.244	97.15	96.35	72.15	0.253	AGUA LIMPIA
12	1700	09:00	17.00	20.104	109.54	108.74	84.54	0.238	AGUA LIMPIA
15	1800	12:00	21.00	22.345	120.87	120.07	95.87	0.233	AGUA LIMPIA
16	2000	13:00	28.00	25.801	146.50	145.70	121.50	0.212	AGUA LIMPIA

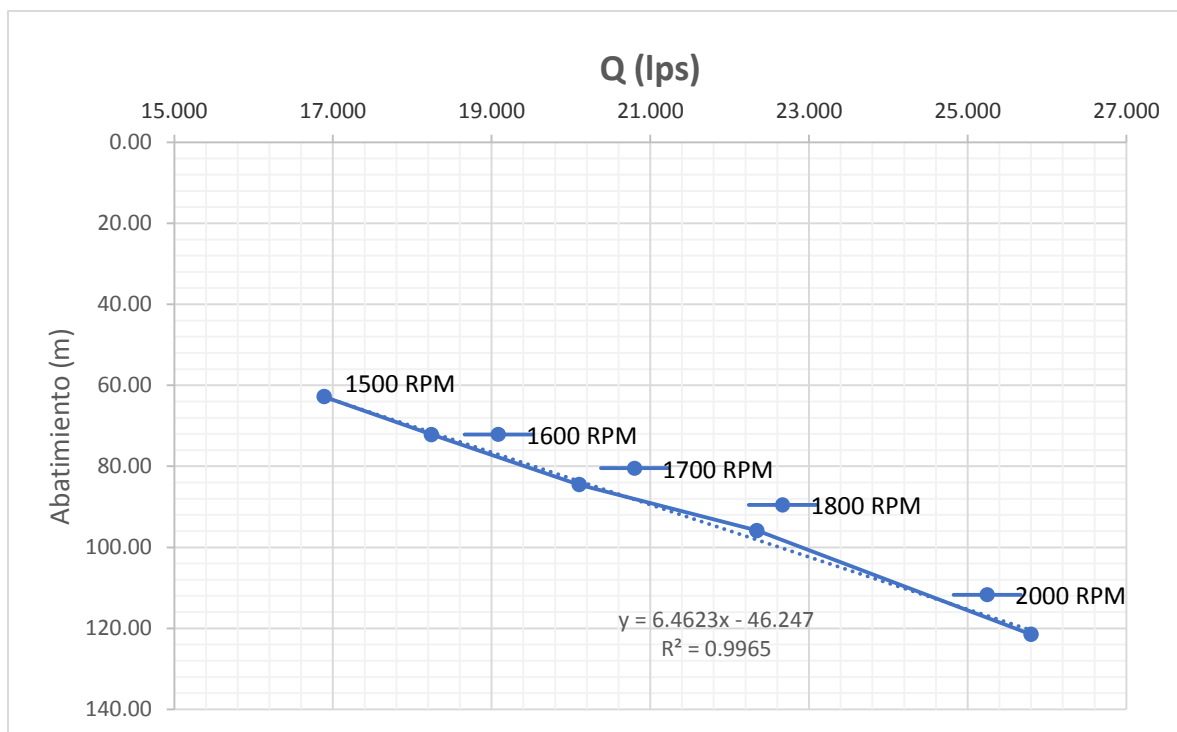


Figura 74. Caudal óptimo del pozo TC-06, etapa de aforo. Por IDEAS, (2017).

2.- La prueba a caudal constante se realizó con un **caudal promedio de 18.24 LPS, con un nivel dinámico de 98.90 m, un abatimiento de 72.35 m**, con un bombeo a 1600 RPM.

3.- Con base en el análisis de la prueba de caudal constante, y procurando minimizar la interferencia entre los radios de influencia de los pozos aledaños, **se recomienda equipar el pozo TC-06 con las siguientes características de bombeo:**

NIVEL ESTÁTICO:	NE: 24.13 m
NIVEL DINÁMICO:	ND: 116.12 m
CAUDAL DE OPERACIÓN:	Q: 10 l/s
ABATIMIENTO (NE-ND):	31 m
CAUDAL ESPECÍFICO:	0.221 l/s/m
LONGITUD DE COLUMNA DE BOMBEO:	150 m

8. CONCLUSIÓN

Durante las prácticas profesionales, los alumnos tienen la oportunidad de ampliar su visión acerca del campo laboral; es la oportunidad de poner en práctica los conocimientos teóricos adquiridos a lo largo de la carrera profesional. De igual forma, a las empresas les permite mantenerse a la vanguardia con nuevos procesos y conservar el vínculo académico con las universidades.

En lo particular, siempre tuve una inclinación hacia la Hidrogeología y, gracias a la experiencia descrita anteriormente, tuve la oportunidad de reafirmarlo. Los procesos implicados en el estudio de acuíferos son muy variados; desde trabajo de gabinete y modelación computacional, hasta la exploración directa. Sin embargo, en cada uno de los procesos se busca perturbar lo menos posible al acuífero y al ecosistema en general.

Mi actuar en la empresa IDEAS durante la realización de mis prácticas profesionales, fue brindar apoyo al Hidrogeólogo encargado de las descripciones litológicas, supervisión en la perforación de barrenos, así como en la prueba de Aforo. Esto me permitió generar un entendimiento y visión a menor escala de los procesos geológicos ya que, por lo general, éstos son estudiados a grandes proporciones y con efectos de gran magnitud.

9. AGRADECIMIENTOS

Primeramente al Dr. Miguel Rangel Medina por permitirme, como director y propietario de IDEAS, realizar las prácticas profesionales con su equipo de trabajo. Gracias al M. C. Adrián Grijalva por darme las bases dentro de la empresa y, al M. C. An Ho Taylor por su paciencia y enseñanza de los procesos en un aforo.

A mi familia; especialmente a mi madre, a mi amiga y colega Yedid Pérez, así como a todos los maestros que participaron en mi formación académica, creando y manteniendo el interés en la geología cada día.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

Capítulo 1:

- Cretot, N. (2016). *Campagne d'exploration hydrogéologique dans le domaine minier de la Cananea, Sonora, Mexique (CONFIDENTIAL)*. Beauvais, Francia, Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, pp. 21-22.

Capítulo 2:

- Chow, V. T. (1994). *Applied Hydrology*. New York, EUA, Ed. McGraw-Hill, pp.5-6.
- Núñez Solís, Jorge. (2001). *Manejo y Conservación de Suelos*. Costa Rica, Ed. Universidad Estatal a Distancia, pp. 43-45.
- Dr. Rangel Medina, Miguel. (2016). *Perforación de pozos para extracción de agua e Investigación Hidrogeológica*. Hermosillo, Sonora, Universidad de Sonora, pp. 93-95, 104-109, 178-199.

Capítulo 3:

- Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), Dirección de Aguas Subterráneas. (1970). *Estudio de hidrología superficial de los valles de los Ríos San Miguel, Sonora, Zanjón, Bacoachi y Mátape, Sonora*. Empresa Ariel Construcciones, S. A.
- Comisión Estatal del Agua (CEA) en Sonora. (2005). *Estudio Geohidrológico de las Subcuencas de los Ríos Sonora, Zanjón, San Miguel, Mesa del Seri-La Victoria y Cuenca Bacoachito*. Hermosillo, Sonora, Universidad de Sonora.
- García, E. (1964). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. Distrito Federal, México, Instituto de Geografía, UNAM.

REFERENCIAS

Capítulo 1:

- **Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente S.A. de C.V.**
<http://www.ideasenagua.com>
- **Universidad de Sonora. Prácticas profesionales Geología.**
http://www.uson.mx/oferta_educativa/pe/licgeologia.htm#egreso

Capítulo 2:

- **Ordoñez Gálvez, Juan Julio. (2011). *¿Qué es una cuenca hidrológica? Cartilla técnica.* Lima, Perú, Sociedad Geográfica de Lima, pp. 6-7, 9-10. Recuperado de:**
http://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf
- **CONAGUA. (2007). *Perforación de pozos.* Distrito Federal, México, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, pp. 10-17. Recuperado de:**
<ftp://ftp.conagua.gob.mx/Mapas/libros%20pdf%202007/Perforaci%C3%B3n%20de%20Pozos.pdf>

Capítulo 3:

- **CONAGUA. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Río Bacanuchi (2628), Estado de Sonora.* Distrito, Federal, México, Subdirección General Técnica. Recuperado de:**
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/104321/DR_2628.pdf
- **CONAGUA. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Río Bacoachi (2627), Estado de Sonora.* Distrito, Federal, México, Subdirección General Técnica. Recuperado de:**
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/104320/DR_2627.pdf

- **INEGI. (2000). *Síntesis de Información Geográfica del Estado de Sonora*. Inédito, pp. 14. Recuperado de:**
http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825223328/702825223328_3.pdf
- **INEGI. (1993). *Estudio Hidrológico del Estado de Sonora. Aguascalientes, Aguascalientes*. Recuperado de:**
http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825221294/702825221294_1.pdf
- **Lugo-Hubb, José. (1990). *El relieve de la República Mexicana. Distrito Federal, México*, Instituto de Geografía, Universidad Autónoma de México. Recuperado de:**
<http://www.biblioteca.org.ar/libros/91347.pdf>
- **Servicio Geológico Mexicano. (1997). *Carta Geológica-Minera de Cananea H12-5. Pachuca, Hidalgo*. Recuperado de:**
http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/17_H12-5_GM.pdf

Capítulo 5:

- **CONAGUA. (2007). *Perforación de pozos*. Distrito Federal, México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, pp. 78-80, 83-86, 90-98. Recuperado de:**
<ftp://ftp.conagua.gob.mx/Mapas/libros%20pdf%202007/Perforaci%C3%B3n%20de%20Pozos.pdf>
- **UNAM. *Capítulo III.- Importancia de los lodos de perforación*. Pp. 18-19. Recuperado de:**
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/128/A5.pdf?sequence=5>